

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Simulace protlačování slitin AlMn1Cu a AlFe1,5Mn
klasickým a upraveným nástrojem ECAP

Simulation of Extrusion Process AlMn1Cu and AlFe1,5Mn
Alloys through the Classical and Modified ECAP Die

Student: Bc. Jan Kedroň
Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Stanislav Rusz, CSc.

Ostrava 2009

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě :.....

.....
podpis studenta

Prohlášení o využití výsledků práce

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :

.....
Podpis studenta

Na Vrše 168
Zlín - Jaroslavice
PSČ 760 01

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KEDROŇ, J. *Simulace protlačování slitin AlMn1Cu a AlFe1,5Mn klasickým a upraveným nástrojem ECAP*. Ostrava: katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009, 70 s., Diplomová práce, vedoucí: Ruzs, S.

Diplomová práce se zabývá matematickou simulací procesu protlačování nástrojem ECAP ve 3D prostoru a také vývojem simulace pro proces CONFORM. V první kapitole je provedena rešerše nových poznatků ve vývoji simulací se zaměřením na technologie využívající vícenásobnou plastickou deformaci. V praktické části diplomové práce byla provedena matematická simulace a stanovení velikosti deformačně-napěťového stavu u slitin AlMn1Cu a AlFe1,5Mn v programu QForm. Dále je představen směr vývoje v oblasti konstrukčního řešení nástrojů pro technologii vícenásobného tváření za účelem zvýšení stupně deformace po prvním a více průchodech nástrojem. Další část práce se zabývá procesem CONFORM a návrhem simulace protlačování Al plechu modifikovaným nástrojem CONFORM. V závěrečné části diplomové práce je vyhodnocení dosažených poznatků matematické simulace technologie ECAP v programu QForm.

ANNOTATION OF THESIS

KEDROŇ, J. *Simulation of Extrusion Process AlMn1Cu and AlFe1,5Mn Alloys through the Classical and Modified ECAP die*. Ostrava: Faculty of Mechanical Engineering VŠB-Technical University of Ostrava, 2009, 70 p., Thesis, leader: Ruzs, S.

Dissertation consider mathematical simulation of the process squirting forming by the tool ECAP in 3D area and also progresses of simulation for CONFORM process. First chapter concerned search piece of knowledge and know-how in development of simulation with sight on technology making use of multiple plastic deformation. In the practical part of the dissertation was been made mathematical simulations of forming and was been assignment of deformation and tension size for alloys AlMn1Cu and AlFe1,5Mn. For simulations was been bring to bear software QForm. In the next chapter of dissertation is introduced new tendency of development in the sphere of forming tools construction for technologies of multiple plastic deformations in the first and multiply forming operation. Another part of this dissertation is concerned with CONFORM process and in this part is occupy by simulation of squirting process with Al alloys. In the final part of dissertation are submitting data evaluations of the mathematical simulation technology ECAP by program QForm.

Obsah diplomové práce

Seznam použitého značení.....	8
Seznam použitých zkratk.....	9
ÚVOD	10
1 NOVÉ POZNATKY ZE SIMULACÍ VÍCENÁSOBNÉ PLASTICKÉ	
DEFORMACE.....	12
1.1 Důvody pro využívání počítačové simulace	12
1.2 Dosažené poznatky z jednotlivých teoretických modelů vzniku nanostrukturních materiálů	12
1.3 Přírůstkové protlačování plechu I-ECAP	14
1.4 Double-Billet I-ECAP	17
2 MATEMATICKÁ SIMULACE PROTLAČOVACÍHO PROCESU ECAP.....	19
2.1 Úvod do problematiky procesu ECAP	19
2.2 Simulační program a popis programu QForm.....	21
2.3 Použité materiály vzorků pro simulaci proces ECAP	23
2.3.1 Slitina AlMn1Cu	23
2.3.2 Slitina AlFe1,5Mn	24
2.4 Volba vhodného typu průchodu	25
2.4.1 Matematické modelování průchodu typu „Bc“ v programu QForm.....	25
2.5 Navržené geometrie tvářecího nástroje ECAP	26
2.5.1 Geometrie klasického kanálu	27
2.5.2 Geometrie kanálu s vyosením horizontální části nástroje o 20°	27
2.6 Protlačování za rozdílných teplot	28
2.7 Zadané parametry pro vlastní simulace matematického modelování	28
2.8 Analýza matematického modelování technologie ECAP při jednom a více průchodech	30
2.9 Vyhodnocování výsledků simulace.....	31
3 SIMULACE PROTLAČOVÁNÍ KANÁLEM ECAP A VLIV POČTU	
PRŮCHODŮ NA DOSAŽENÝ STUPEŇ DEFORMACE.....	32
3.1 Matematické modelování průchodu slitiny AlMn1Cu s klasickým a vychýleným kanálem v horizontální části o 20°	32
3.1.1 Intenzita deformace	32
3.1.2 Deformační napětí	35
3.2 Matematické modelování průchodu slitiny AlFe1,5Mn s klasickým a vychýleným kanálem v horizontální části o 20°	37

3.2.1	Intenzita deformace	38
3.2.2	Deformační napětí	41
3.3	Vliv počtu průchodů na velikost deformačně-napěťového stavu u zadaných slitin	43
3.4	Porovnání výsledků intenzity deformace s výsledky dosaženými programem FormFEM	43
4	ANALÝZA VLIVU ZMĚNY GEOMETRIE NÁSTROJE ECAP NA DOSAŽENÝ STUPEŇ DEFORMACE	47
4.1	Konstrukční návrh s vychýlenou výstupní částí protlačovacího nástroje o 10° ...	47
4.2	Konstrukční návrh s vychýlenou výstupní částí protlačovacího nástroje o 20° ...	50
4.3	Konstrukční návrh nástroje se šroubovicí ve vertikální části kanálu	51
4.4	Konstrukční návrh nástroje se šroubovicí v horizontální části kanálu	54
5	NÁVRH SIMULACE PROTlačOVÁNÍ AL PLECHU MODIFIKOVANÝM NÁSTROJEM CONFORM	57
5.1	Úvod do problematiky CONFORM	57
5.2	Současný stav vývoje simulace procesu CONFORM	58
5.3	Návrh simulace protlačování Al plechu modifikovaným nástrojem CONFORM61	
6	VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ A POZNATKŮ TECHNOLOGIE ECAP	63
6.1	Úprava nástroje s cílem zvýšení intenzity deformace	65
	ZÁVĚR	66
	PODĚKOVÁNÍ	68
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	69
	SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ SOUVISEJÍCÍCH S TOUTO DIPLOMOVOU PRACÍ	70

Seznam použitého značení

Značka	Název veličiny	Jednotka
A_{50-100}	Nejmenší tažnost	[-]
b	Šířka kanálu	[mm]
b_l	Šířka kanálu mezi napojením jeho vertikální a horizontální části	[mm]
d	Velikost zrna	[nm]
ε	Poměrná deformace	[%]
ε_i	Intenzita deformace	[-]
ε_v	Výsledná deformace pro směry x, y, z	[-]
$\overline{\varepsilon}$	Intenzita rychlosti přetvoření	[s ⁻¹]
$\varepsilon_{x, y, z}$	Stupeň logaritmické deformace	[-]
F	Síla	[N]
Φ	Úhel přechodu dvou kanálů	[°]
l	Počáteční délka vzorku před zkouškou	[mm]
p	Protlačovací tlak	[MPa]
ψ	Úhel zaoblení přechodu	[°]
q	Parametr atomové hustoty	[-]
R_l	Vnitřní radius nástroje ECAP	[mm]
R_2	Vnější radius nástroje ECAP	[mm]
R_3	Poloměr zaoblení odlehčené části	[mm]
R_5	Poloměr zaoblení přechodu mezi natočeným a rovným kanálem	[mm]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
S	Plocha	[m ²]
$\overline{\sigma}$	Střední deformační napětí	[MPa]
σ_i	Deformační napětí	[MPa]
T	Konstantní teplota	[°C]
T_n	Teplota nástroje	[°C]
T_p	Teplota polotovaru	[°C]
T_t	Teplota tavení	[°C]
V	Objem tělesa	[m ³]

Seznam použitých zkratek

ECAP	Protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem <i>Equal Channel Angular Pressing</i>
CONFORM	Kontinuální protlačování <i>Continuous Extrusion Forming</i>
FEM	Metoda konečných elementů <i>Finite elements methods</i>
MKP	Metoda konečných prvků
FE	Konečný prvek <i>Finite element</i>
UFG	Ultra jemnozrnné materiály <i>Ultra Fine Grain</i>
TEM	Transmisní elektronický mikroskop
SPD	Vícenásobná plastická deformace <i>Severe plastic deformation</i>
I-ECAP	Přírůstkové protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem <i>Incremental - Equal Channel Angular Pressing</i>

ÚVOD

Trvale udržitelný rozvoj lidské společnosti je podmíněn maximální šetrností neobnovitelných zdrojů energie a surovin, zejména na bázi kovů. Jednou z cest, jak lze toho dosáhnout je vedle recyklace odpadů slitin na bázi železa, hliníku a mědi, soustavné snižování jejich spotřeby cestou zvyšování kvality a životnosti užitných předmětů a konstrukcí z nich vyrobených. Současný technický pokrok vyžaduje vyvíjení nových technologií výroby, které zahrnují nejen vývoj nových materiálů, ale také optimalizací produktivity vlastní výroby. Vývoj materiálů s ultra-jemnou strukturou neboli nanostrukturních materiálů patří v současnosti k předním oblastem výzkumu materiálů a tvářecích technologií ve významných vědeckých ústavech i univerzitách. Během posledních let je prováděn výzkum nanotechnologií ve vysokém tempu, poněvadž tyto bezprostředně ovlivňují vývoj nových materiálů a následně výrobků. Jejich technologický a obchodní světový přínos bude v budoucnu hlavní ekonomickou silou rozvoje moderní výroby. Submikrokrystalické materiály s průměrnou velikostí zrna od 50 do 200 nm se vyznačují velmi vysokou tvářitelností při zachování velmi dobrých pevnostních vlastností.

Zvýšená pozornost vědeckého výzkumu v dané oblasti je věnována fyzice kovů, stavu jejich struktury a vlastností ve fázi pevné – krystalizaci, atomovou skladbu, meziatomární poměry a síly, submikrostrukturu, poruchy mřížky, její uzdravování ap. Experimentální výsledky řady renomovaných pracovišť naznačují, že vysokým nebo vícenásobným využitím plastické deformace kovů lze vyrobit materiály s mimořádnými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, technologicky využitelnými k výrobě extrémně namáhaných součástí či konstrukcí.

Technologií vícenásobné plastické deformace (*Equal Channel Angular Pressing* – protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem), dále v práci označováno jako ECAP je dosaženo vysokého stupně deformace. Finálním výsledkem je dosažení ultra-jemnozrné struktury. Tento proces je znám již od roku 1980, přičemž konečná aplikace se postupně začíná dostávat do technické praxe. Základní koncepce využití procesu ECAP je především získání nových poznatků v oblasti deformačních odporů, vlivu stavu napjatosti na tvářitelnost materiálu. Výsledkem řešení bude prohloubení znalostí o deformačním chování kovových ultra-jemnozrných materiálů (nanomateriálů) a vlivu plastické deformace na strukturu, mechanické vlastnosti a tvařitelnost. Technologie ECAP umožňuje získat ultra-jemné zrna ve větších objemech, přičemž příčný průřez polotovaru zůstává konstantní.

Dané materiály se využívají zejména v automobilovém průmyslu, vojenském a kosmickém průmyslu. Polotovary vyrobené popisovanou technologií mohou být dále zpracovány do finální podoby – např. technologií superplastického tváření (slitiny Ti, Mg apod.).

Výrobky vytvořené technologií ECAP se mohou vyznačovat specifickými vlastnostmi. Při použití těchto materiálů v předem definovaných podmínkách lze zvyšovat nároky na jejich vlastnosti, popř. ovlivnit vlastnosti rozvojem vhodné struktury získané tvářením. Dle požadavků lze měnit finální nanostrukturu a optimalizací tvářecích parametrů lze dosáhnout potřebných mechanických vlastností tak, aby při daném účelu použití výrobky zaručovaly provozní spolehlivost a bezpečnost.

Velmi významným se jeví ověřování jak geometrie nástroje, tak i vlastní proces tváření a to matematickým modelováním s využitím metod MKP. V současné době nejsou jednoznačně potvrzeny výsledky experimentu vhodným matematickým modelem, který by danou problematiku dostatečně popsal.

1 NOVÉ POZNATKY ZE SIMULACÍ VÍCENÁSOBNÉ PLASTICKÉ DEFORMACE

1.1 Důvody pro využívání počítačové simulace

Simulací lze řešit i velmi složité technologické operace, které jsou neřešitelné nebo obtížně řešitelné analytickými metodami, popř. kde by použití analytického řešení bylo příliš zjednodušující. Pomocí simulace je rovněž možné prověřit výsledky docílené jinými metodami z hlediska experimentů nebo výsledků z praxe.

Simulace umožňuje studium chování tvářeného materiálu v reálném, zrychleném nebo zpomaleném čase. Po zhotovení geometrického modelu a provedení simulačního výpočtu lze pak během několika minut nasimulovat průběh celé technologické operace.

Již samotné zkušenosti z tvorby simulačního modelu mohou vést k návrhům na zlepšení geometrie či materiálu. Vytvoření simulačního modelu totiž není možné bez důkladné analýzy zkoumaného problému, která může odhalit v samém začátku zpracování zadání značné rezervy.

Simulace nabízí komplexní pohled na studovaný problém a umožňuje tak jeho analýzu na základě více kritérií. Změnou jednoho konstrukčně - technologického parametru lze sledovat jeho vliv jak na chování tvářeného materiálu, tak na průběh technologické operace tváření i na případné vady produktu.

Pomocí simulace je možné důkladně prověřit různé varianty řešení. To umožňuje minimalizovat rizika chybných rozhodnutí [1].

1.2 Dosažené poznatky z jednotlivých teoretických modelů vzniku nanostrukturních materiálů

Obecně jsou zde dva způsoby teoretického přístupu popisu neobvyklého Hall-Petchova efektu, který je podstatný u nanokrystalických materiálů narozdíl od konvenčních hrubozrnných polykrystalů, kde mez kluzu podle klasického Hall-Petchova vztahu roste se zmenšením velikosti zrna d .

Jednotlivé teoretické modely přistupují k nanokrystalickým materiálům jako ke kompozitům s hranicemi zrn a vnitřky zrn základních fází. V rámci tohoto přístupu je dána mez kluzu tzv. pravidlem směsi (konvenčně použité teorie kompozitů) jako tzv. vážená suma

mezi kluzu, která charakterizuje fázi hranic zrn a vnitřky zrn. Teoretické modely se zaměřují na mikroskopické (fyzikální) mechanismy plastické deformace v nanokrystalických materiálech. Tento přístup přisuzuje Hall-Petchovu efektu základní úpravu obvyklého pohybu mřížkové dislokace nebo přechod do dalšího deformačního mechanismu v plasticky deformovaných nanokrystalických materiálech s vysokou hustotou hranic zrn. Různé teoretické modely dávají různé vysvětlení neobvyklého Hall-Petchova vztahu, většina z nich odpovídá příslušným experimentálním výsledkům.

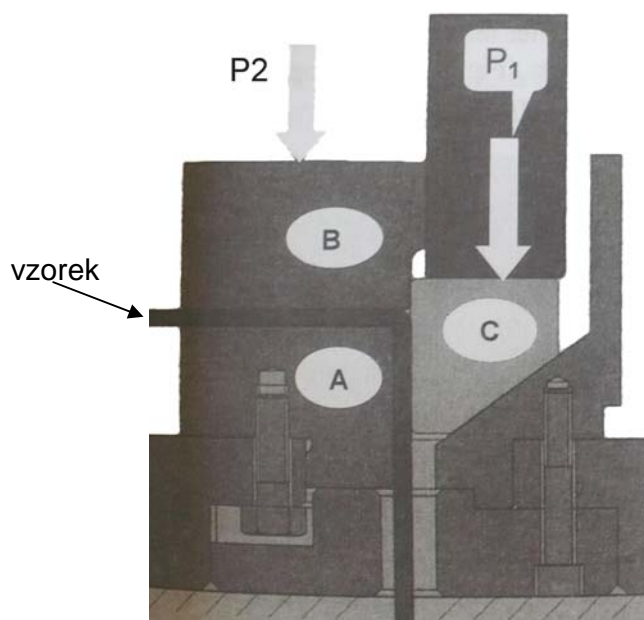
Složitost experimentálního určení deformačních mechanismů v nanokrystalických materiálech spočívá v jejich velmi obtížně definovatelné nanorozměrné struktuře a její schopnosti podstatné změny struktury v průběhu vícenásobné plastické deformace.

Deformační mechanismy mohou být různé v odlišných nanokrystalických materiálech nebo dokonce ve stejném materiálu při různých podmínkách zatížení (teplota, deformační rychlost):

- (1) Teoretický popis nových deformačních mechanismů (zvláště rotace nanozrn) v nanokrystalických materiálech.
- (2) Teoretický popis úlohy trojných uzlů a čtyřnásobných uzlů hranic zrn (které jsou považovány za termodynamicky zřetelné fáze, samostatné, oddělené od hranic zrn a vnitřků zrn), v deformačních procesech u nanokrystalických materiálů.
- (3) Vývoj zobecněného modelu, který bude popisovat kombinovanou úlohu různých deformačních mechanismů (jako je pohyb dislokací v zrnech, skluz po hranicích zrn, mechanismus difuze spojený s rozptylem hranic zrn a difuzí trojných uzlů) jehož vliv na plastický tok v nanokrystalických materiálech je závislý na vlastnostech materiálu, rozložení zrn a podmínkách zatížení.
- (4) Teoretická analýza specifických znaků plastického toku v nanokrystalických tenkých vrstvách a povlacích, kde zbytková pnutí zásadně ovlivňují strukturu hranic zrn a deformační procesy.
- (5) Teoretická analýza zvláštních znaků plastického toku v nanokompozitních materiálech, kde kompozitní struktura a mezifázové hranice jsou schopny silně ovlivňovat deformační procesy.
- (6) Teoretická analýza vlivu plastické deformace na strukturální stabilitu (oproti růstu zrna) v nanokrystalických materiálech [2].

1.3 Přírůstkové protlačování plechu I-ECAP

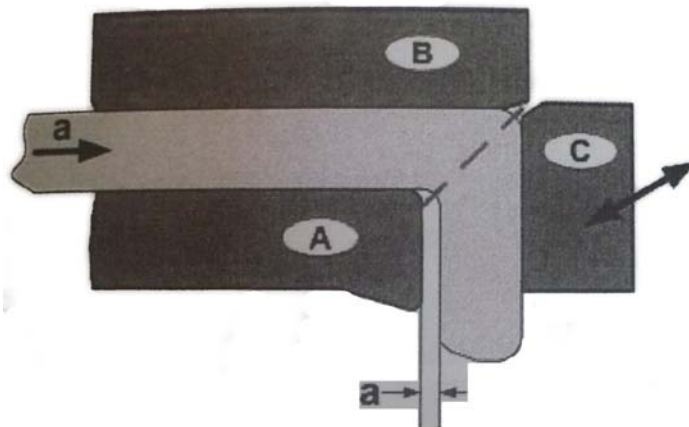
Skupina procesů SPD (*severe plastic deformation*) je převážně užívaná pro laboratorní účely. Více průmyslově orientované technologie jsou nepřetržité procesy, mezi které patří nový proces I-ECAP (*Incremental - Equal Channel Angular Pressing*). Tato kapitola objasňuje proveditelnost použití I-ECAP pro nanostrukturní pásy plechu. Nejprve byla vykonána 3D simulace s použitím konečných prvků, která nám dává význam limitů materiálového toku směrem do šíře pásu plechu. Experimentální zařízení do laboratoře bylo navrženo tak, aby přeměnilo svislý pohyb chodu stroje do šikmého vratného pohybu (viz. obr. 1.1). Předběžné zkoušky I-ECAP byly uskutečněny na hliníkových pásech plechu. Metalurgické vzorky byly následně porovnávány a zaznamenány použitím TEM po čtvrtém a osmém průchodu I-ECAP (cestou A).



Obr. 1.1 Experimentální zařízení I-ECAP [3]

Základní koncept procesu I-ECAP je znázorněn na obrázku 1.2. Nástroje „A“ (matrice) a „B“ (podpěra) definují vstupní kanál zatímco „A“ a „C“ (trn) výstupní kanál ze zařízení. Nástroj C se pohybuje vratným způsobem ve vhodném úhlu k polotovaru, který má za následek cyklický kontakt s polotovarem. Dávkování polotovaru se uskutečňuje během odsunu trnu, kdy zde není žádný kontakt. Jakmile je přisun polotovaru u konce, trn se pohybuje zpět směrem k polotovaru a znovu probíhá plastická deformace. Deformace

probíhá mechanismem prostého smyku poskytnutý pomocí vzdálenosti „a“ (vzdálenost "a" viz. obr. 1.2). Za sebou jdoucí dislokační pásma, která se překrývají, mají za následek jednotné napět'ové směšovací stupně; toto umožňuje výrobu nekonečných pásů.

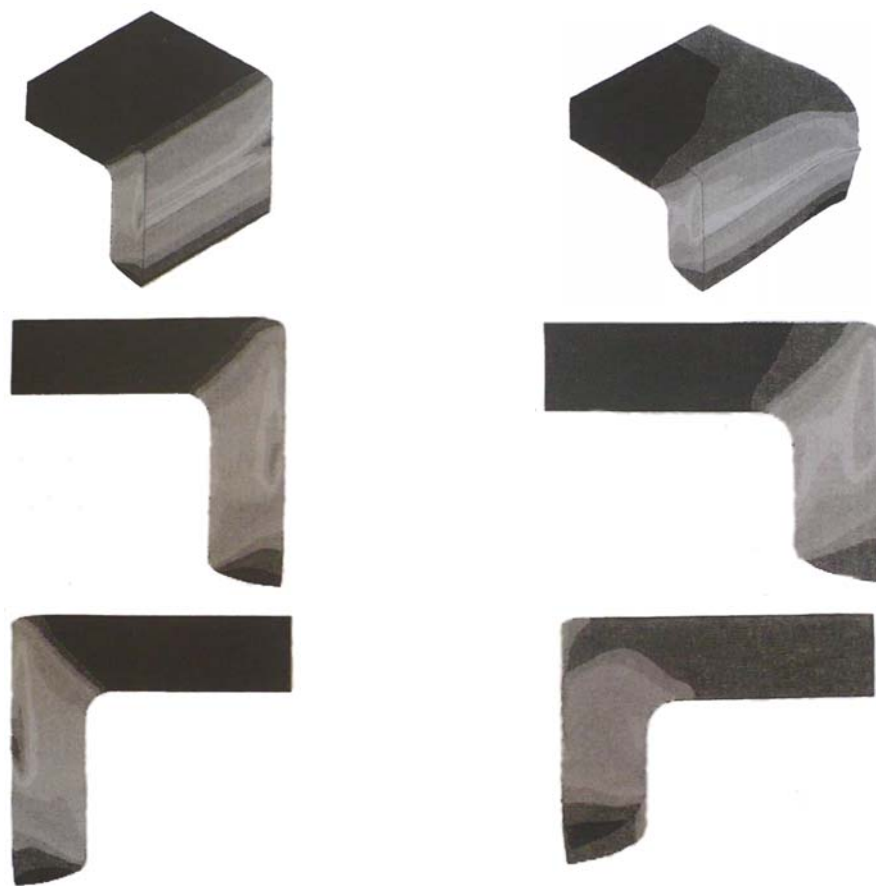


Obr. 1.2 Princip technologie I-ECAP [3]

Před jakýmkoliv novým způsobem tváření je nutno provést modelové zkoušky v laboratořích. Je simulován materiálový tok, styčný tlak nástroje a závislost síly na dráze. Dále se využívá matematické simulace tvářecího procesu pomocí FEM analýzy. Dané simulace a modelové zkoušky by měly pomoci k vyvarování se problémům vzniklým při konstrukci nástrojů, návržením vhodné kinematiky, dimenzi potřebné tvářecí síly a pevnosti nástroje.

Hlavním účelem je využití 3D FE programu k simulaci pružně-plastických toků materiálů u technologie I-ECAP. Kvůli souměrnosti tabule plechu je možné analyzovat jen její polovinu. Vstupní kanál má 4 mm x 5 mm v příčném řezu tak, aby simuloval tvar tabule o tloušťce 4 mm a šířce 30 mm s úhlem kanálu 90°. Vnitřní hrana matrice byla zaoblena na poloměr $r = 1,5$ mm. Dávkovací cyklus je 1 mm a je synchronizován s vratným pohybem trnu.

Mezi mnohými dostupnými výsledky je nejdůležitějším faktorem intenzita deformace, neboť má podstatný vliv na strukturu materiálu. Na obrázku 1.3 je znázorněno rozložení materiálového toku s omezením ve směru jeho šířky (tzn. rovinné přetvoření) viz. obrázek 1.3 a). Pro srovnání jsou také provedeny simulace bez tohoto omezení (viz. obr. 1.3 b). Obrázky s omezeným tokem jsou často uváděny ve 2D FE formátu získanými s klasickým ECAP procesem. Je nutno si uvědomit, že 3D FE simulace umožňuje podrobněji sledovat daleko menší změny v průběhu napětí v celém objemu vzorku a tímto postihnout vliv tření mezi bokem nástroje a materiálem. I když je obrázek 1.3 a) vcelku přehledný (pás široký 30 mm), koeficient tření 0,1 nemá dostatečnou velikost aby byl v simulaci zachycen jeho vliv. Materiál teče poměrně volně dovnitř kanálu, směrem do šířky, která vede k velkému zborcení vzorku a vysoce nejednotnému napětí rozloženému ve směru šířky pásu. Pro odpovídající simulaci tváření širokých pásů plechů by nemohl být využitý proces I-ECAP bez patřičného omezení toku ve směru šířky [3].



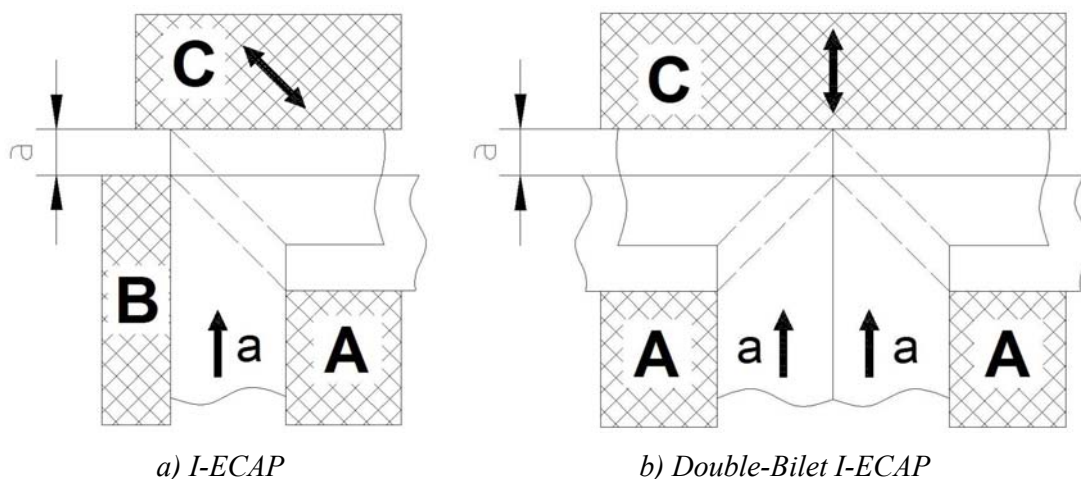
a) s omezenou šířkou

b) bez omezení šířky

Obr. 1.3 Rozložení intenzity deformace u procesu I-ECAP [3]

1.4 Double-Billet I-ECAP

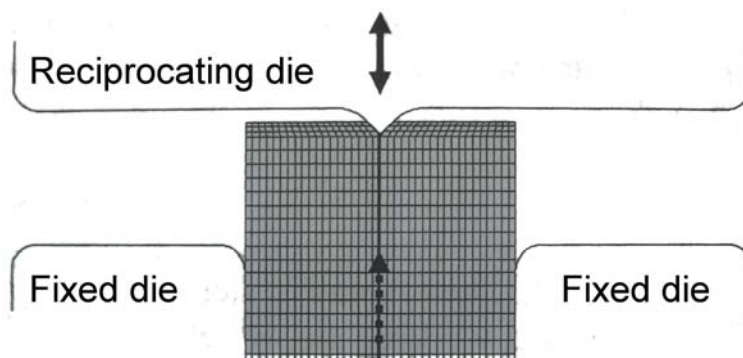
Tato kapitola pojednává o dvojité verzi I-ECAP, která zdvojnásobuje produktivitu. Nejdříve se koncept procesu zkontroluje metodou konečných prvků. Výsledky této metody budou základem pro další experimentální zařízení a výbavu laboratoře. Zkoušky s hliníkovým vzorkem jsou uskutečněny protlačováním pravidelně podávaného vzorku nástrojem s vratným pohybem matrice. Metalografická analýza byla provedena na TEM po 4. a 8. průchodu kanálem I-ECAP (cesta „Bc“). Následně byly stanoveny jejich mechanické vlastnosti. Výsledky ukazují, že nový SPD proces I-ECAP má srovnatelné výsledky dosažené klasickou metodou ECAP, ale přidává výhodu týkající se schopnosti zpracovávat mnohem delší (možná nekonečně dlouhé) polotovary.



Obr. 1.4 Princip technologie I-ECAP a Double-Billet I-ECAP [4]

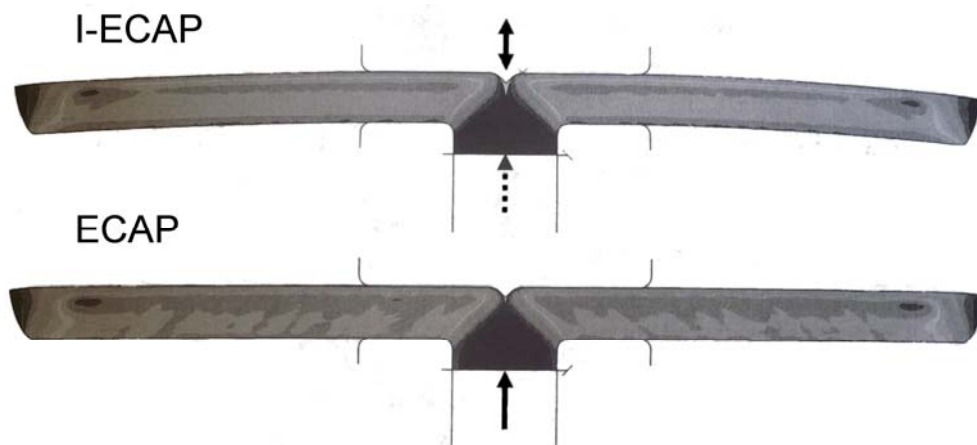
V předešlé kapitole jsem se zabýval klasickou metodou I-ECAP (viz. obr. 1.4 a). Z hlediska produktivity a souměrnosti protlačovaných vzorků můžeme uvážit použití dvou polotovarů a protlačovat je do klasického pravoúhlého kanálu. Daný princip je představen na obrázku 1.4 b). V porovnání s klasickým procesem je v procesu I-ECAP (viz. obr. 1.4 a), matrice „B“ stejná jako „A“, matrice „C“ se prodloužila kvůli užití na oba polotovary. Z obrázku 1.4 a) je zřejmé, že dostáváme dvě pásma prostého smyku. To zvýší potřebnou velikost protlačovací síly, ale ne více než na dvojnásobek a to vlivem tření na vstupu, které se sice zvýšilo, ale méně než dvojnásobně [4].

Pro simulaci procesu byl vybrán simulační 3D FE model. Vstupní kanál byl rozdělen na rozměr 10 mm x 20 mm, který se dělí na dva výstupní kanály o velikosti 10 mm x 10 mm s úhlem kanálu 90° a to na obě strany. Zaoblení rohů matrice je $r = 2$ mm. Vratný pohyb matrice s hrotem má za následek usnadnění toku materiálu do výstupního kanálu (viz obr. 1.5). Polotovár je rozdělen dle strany styku s hrotem. Dávkovací cyklus matrice je 1 mm souměrně s osou vstupního kanálu.



Obr. 1.5 Princip technologie Double-Billet I-ECAP [4]

Obrázek 1.6 zobrazuje rozložení deformace pro I-ECAP a pro srovnání také pro klasický kanál ECAP. Dosažená intenzita deformace pro oba procesy je $\underline{\epsilon}_i = 1,15$ a to při podélném průřezu vzorkem v polovině jeho šířky po protlačení. Poměrně malé rozdíly v rozložení deformace jsou pozorovatelné napříč celým vzorkem, kde je dosažena vyšší intenzita deformace na vrchní a spodní části vzorku u procesu I-ECAP. Geometrický rozdíl mezi oběma procesy je charakterizován nepatrným ohybem vzorku u procesu I-ECAP oproti rovnému tvaru vzorku dosaženému v klasickém procesu ECAP. Výše uvedený fakt nám dává obecný závěr, že v rámci intenzity deformace proces I-ECAP dosahuje podobné výsledky jako klasický proces ECAP [4].



Obr. 1.6 Ekvivalentní průběh intenzity deformace pro I-ECAP a klasický ECAP [4]

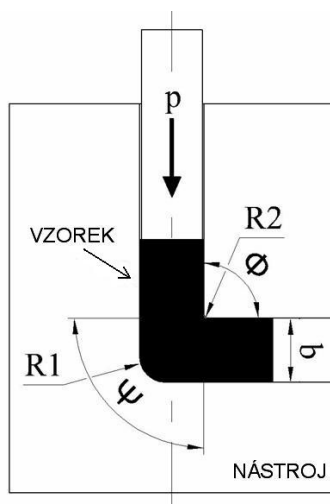
2 MATEMATICKÁ SIMULACE PROTlačOVACÍHO PROCESU ECAP

2.1 Úvod do problematiky procesu ECAP

Podstata metody ECAP spočívá v protlačování buď válcového nebo hranolovitého vzorku kanálem s předem definovanou geometrií. Tvářecí proces je popsán dosaženou velikostí intenzity deformace a intenzity napětí, jakožto hlavních tvářecích parametrů pro dosažení velmi jemnozrné struktury u ověřovaných materiálu. Při navrhované technologii ECAP probíhá tváření vzorku kanálem nástroje v několika etapách. V první fázi se vzorek pěchuje v zakřivené části kanálu a následně protlačuje. Daným postupem dochází k vytvoření pásu střížné deformace v celém objemu protlačovaného vzorku. V ideálním případě dojde v přechodu obou kanálů k čistému namáhání protlačovaného vzorku na stříh. V důsledku pěchovacího procesu je dosaženo vysokého stupně deformace, který je zapotřebí pro vznik subzrn (postupného zjemňování struktury).

Z hlediska volby velikosti úhlu napojení dvou kanálů vyplývají různé stupně deformace. Většinou se používá úhel kanálu od 90° do 135° [5, 6].

Princip technologie ECAP je schématicky nakreslen na obr. 2.1. Nástroj je konstruován s dvěma pravoúhlými kanály v příčném řezu, který protíná úhel Φ a také dodatečný úhel Ψ , který definuje úhel oblouku křivky v řezu dvou kanálů. Zkušební vzorek je přizpůsoben tak, aby v kanálu přiléhá a je stlačen zatížením „p“ prostřednictvím průtlačníku (viz. obr. 2.1).

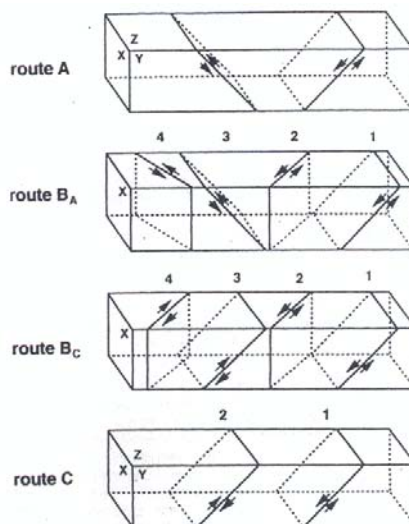


Obr. 2.1 Princip technologie a parametry kanálu ECAP

Jelikož je plocha příčného průřezu vzorku neměnná na jednotlivých místech při průchodu zápusťou, je zřejmé, že opakované protlačování je prováděno za účelem dosažení velmi vysokého stupně deformace. V praxi je možné otočit vzorek mezi jednotlivými protlačováními v různých směrech i jeho orientacích, takže je aktivován odlišný střižný systém [5, 6]. Nyní jsou obecně známé čtyři odlišné průchody kanálem, které jsou popsány jako průchod typu „A“, typu „B_A“, typu „B_C“ a typu „C“ (viz. obr. 2.2).

Při průchodu typu „A“ je vzorek protlačován bez následného otočení, při průchodu „B“ je vzorek otočen o 90° mezi každým protlačením, s otočením se změnou směru, které se přináleží průchodu typu „B_A“ nebo s otočením ve stejném směru při průchodu „B_C“. Při průchodu typu „C“ je vzorek otočen o 180° mezi každým protlačováním.

Pochopit účinek těchto odlišných průchodů kanálem jde nejlépe na příkladech s vnitřními střižnými rovinami tvářeného vzorku. V těchto rovinách jsou znázorněny střižné systémy, které se vyskytují v prvních čtyřech průchodech kanálem.



Obr. 2.2 Typy střižných rovin vznikajících při různých typech průchodů kanálem ECAP

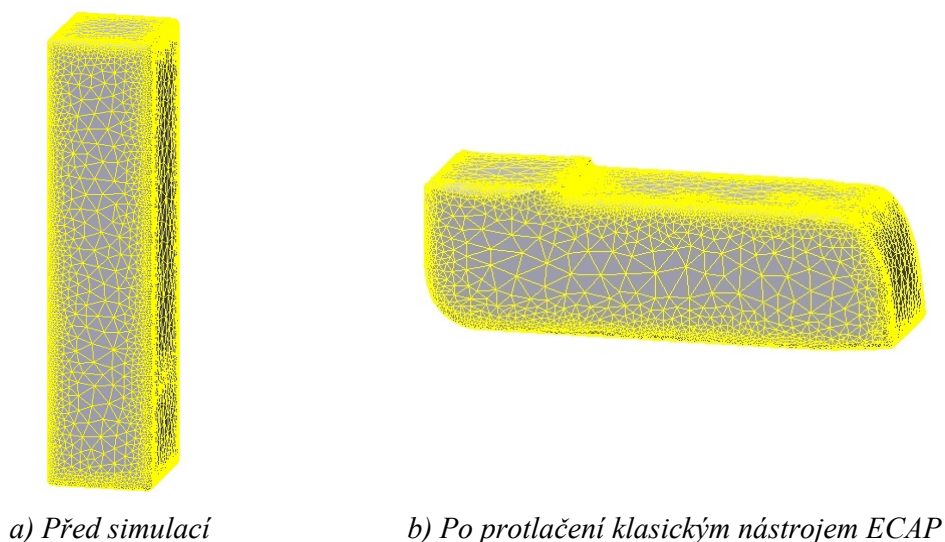
Deformace vznikající ve vzorku, v jeho jednotlivých místech průchodu uvnitř kanálu, je především závislá na úhlu Φ mezi dvěma oddělenými částmi kanálu. Významná je rovněž závislost na úhlu Ψ v horním vnějšku oblouku zakřivení v místě, kde se oba kanálky protínají. [7]

2.2 Simulační program a popis programu QForm

Pro matematické modelování procesu ECAP vícenásobného protlačování s více průchody a návrh nástroje, byl zvolen program QForm 3D softwarový produkt firmy Quantor Ltd., který je určen pro simulaci a analýzu tvářecích procesů v 3D prostředí.

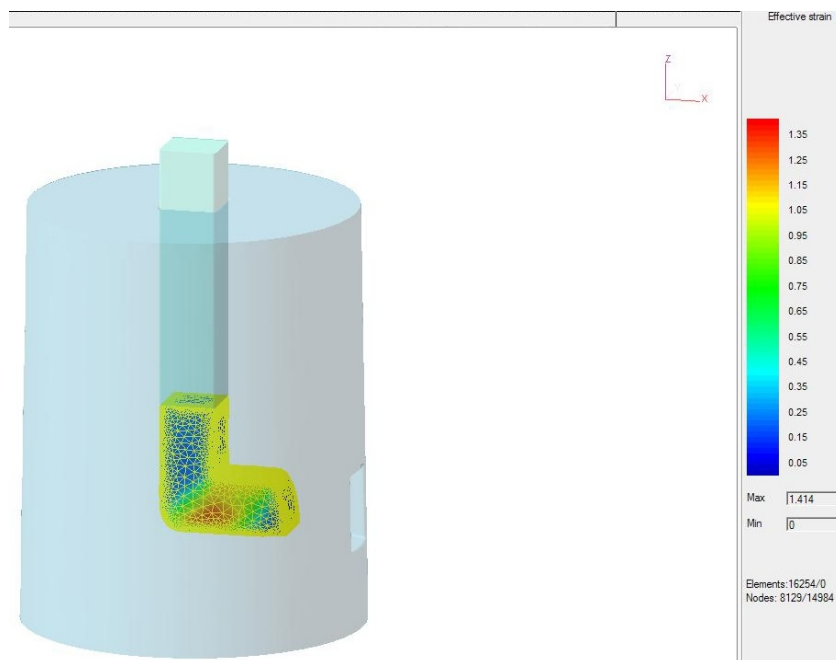
Při výběru programu vhodného pro matematické modelování procesu ECAP vícenásobného protlačování s více průchody a návrh nástroje, bylo zvažováno hned několik podmínek. Pokud vyrábíme tvarově specifické součásti, je vhodnější simulační systém s trojrozměrnou grafikou (3D) pro celkový obraz toku materiálu v jednotlivých částech členitého nástroje. Což znamená, že pro analýzu problematiky vícera průchodů je zapotřebí provést simulaci ve trojrozměrném prostoru. Dále byla zvažována jeho nabídka knihoven, odpovídající mým potřebám v plné míře.

Software QForm 3D, který je určen pro simulaci a analýzu tvářecích procesů v 3D prostředí. softwarový produkt firmy Quantor Ltd. Software pracující na principu FEM (dále jen MKP). QForm 3D je dokonalým nástrojem pro simulaci tváření za tepla i za studena. Numerické parametry simulace není vůbec nutné definovat. Celkový objem vstupních dat je omezen na nezbytné minimum. Na tvářené součásti se vytvoří síť (obr. 2.3), jejíž složitost je závislá na přesnosti simulace.



Obr. 2.3 Síť konečných prvků

Model tváření kovů realizovaný v QFormu odpovídá reálnému procesu tváření. Během animace tvářecího procesu QForm 3D znázorňuje tok materiálu i tok vzniklých defektů. Dále je během simulace vidět teplota v každé části součásti a velikost deformace. Výsledky simulace jsou zobrazovány prostřednictvím 3D grafiky současně s postupem simulace, který poskytuje okamžitou zpětnou vazbu v programu.



Obr. 2.4 QForm 3D - grafické prostředí simulace

Simulace poskytuje úplné informace o rozdělení toků, teploty a deformace v materiálu, o síle, energii a dalších parametrech procesu tváření. QForm pomáhá návrháři nástrojů vybrat polotovár, vyhodnotit kapacitu lisu, optimalizovat tvary předlisku a nástrojů, vybrat vhodnou teplotu polotovaru, navrhnout odpovídající výronek, analyzovat napětí v nástroji a vliv tření na materiál nástroje a zvolit správné mazivo atd. Tak je možné namísto nákladných pokusů vyvíjet a testovat tvářecí technologie za pomoci počítače. QForm je proto praktický a účinný simulační nástroj, který přináší mnoho výhod a úspor. [8, 9]

2.3 Použité materiály vzorků pro simulaci proces ECAP

V současné době se na základě poznatků v oblasti tváření metodou ECAP, potažmo jiných metod výroby UFG materiálů, zájem soustřeďuje především na slitiny na bázi Al, Mg a Ti. Jsou však sledovány i experimenty s vybranými typy dvoufázových ocelí. Diplomová práce je zaměřena na matematické modelování procesu ECAP slitin na bázi Al. Pro simulaci byly použity slitiny materiálů vzorků AlMn1Cu a AlFe1,5Mn o velikosti průřezu 10×10 a délkách 38 a 68 mm.

Jako materiál nástroje využívaný pro experimenty v laboratoři VŠB-TUO je používán materiál Dievar. Rozměry nástrojů jsou zvoleny dle rozměrů polotovarů.

Tento materiál byl vybírán s ohledem k experimentům VŠB-TUO, kde se užívá již zmíněný materiál. Dievar je Cr-Mo-V legovaná vysoce pevná ocel pro práci za tepla s velmi vysokou odolností proti vzniku trhlinek a větších prasklin vlivem tepelné únavy s vysokou odolností proti opotřebení za tepla. Materiál Dievar patří k ocelím s nejvyšší houževnatostí a tažností ve všech směrech, má vysokou odolnost proti popuštění, vysokou pevnost za tepla, velmi dobrou kalitelnost, vysokou rozměrovou stabilitou při tepelném zpracování a povlakování.

Materiál vložky nástroje ECAP byl zvolen po konzultaci s materialisty a odborníky z praxe.

V programu QForm je materiál nástroje nahrazen materiálem 19 552, který je umístěn v databázi programu a je nejbližším ekvivalentem k materiálu Dievar.

2.3.1 Slitina AlMn1Cu

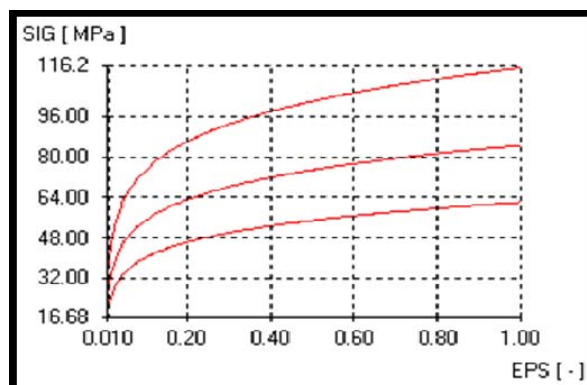
Slitina má vyšší pevnost než čistý hliník při zachování vysoké tvárnosti, má dobrou chemickou odolnost, velmi dobré korozní vlastnosti. Je velmi dobře svařitelný všemi způsoby. Používá se ve stavu měkkém nebo tvářeném za studena. Použití na málo namáhané výrobky připravené válcováním – folie, hlubokým tažením, ohýbáním, svařením (např. přístroje, nádrže, potrubí, chladiče pro automobily a traktory, nádoby na kapalinu). Slitina se též používá pro plátování [10].

Tab. 2.1 Chemické složení slitiny AlMn1Cu

prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Ostatní jednotlivě	Ostatní celkem	Al
[%]	4	2	0,05 – 0,20	0,10	0,05	0,15	zbytek

Tab. 2.2 Fyzikální vlastnosti slitiny AlMn1Cu

NÁZEV VLASTNOSTÍ	JEDNOTKY	HODNOTY
Mez pevnosti R_m	[MPa]	max. 200
Nejmenší tažnost $A_{50} - A_{100}$	[-]	25
Mez kluzu	[MPa]	80 – 120

**Graf. 2.1** Křivka přetvárného odporu slitiny AlMn1Cu

Křivky přetvárného odporu jsou podkladem pro veškeré výpočty, včetně numerických simulací pēchovacích operací a numerické predikce vzniku tvárného porušení protlačovaných polotovarů.

2.3.2 Slitina AlFe1,5Mn

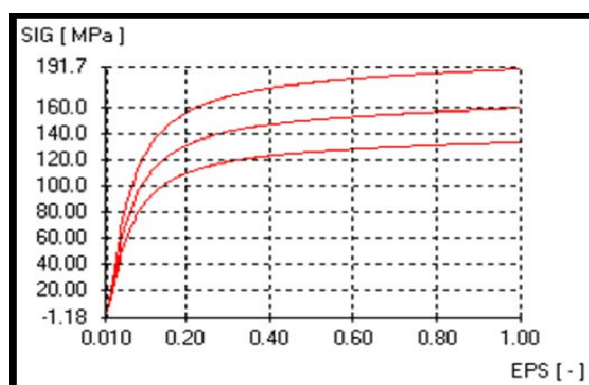
Materiál je pevnější než čistý technický hliník při zachování vysoké tvárnosti. Používá se na středně a silně namáhané součásti. Dobře třískově obrobitelný, málo chemicky odolný. Vytvrzením za studena se významně zvýší pevnost slitiny. Vhodný materiál pro součástky a konstrukční prvky letadel, kolejových vozidel, automobilů a jiných dopravních prostředků [10].

Tab. 2.3 Chemické složení slitiny AlFe1,5Mn

prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
[%]	0,4	1,2 – 2	0,3	0,3 – 1	0,1	0,1	zbytek

Tab. 2.4 Fyzikální vlastnosti slitiny AlFe1,5Mn

NÁZEV VLASTNOSTÍ	JEDNOTKY	HODNOTY
Mez pevnosti R_m	[MPa]	100 – 150
Nejmenší tažnost $A_{50} - A_{100}$	[-]	15
Mez kluzu R_e	[MPa]	70
Teplotní součinitel $1/k$	[$1/^{\circ}\text{C}$]	24/100
Měrná hmotnost	[kg.m^{-3}]	0,0027
Teplota tavení	[$^{\circ}\text{C}$]	658

**Graf. 2.2** Křivka přetvárného odporu pro slitinu AlFe1,5Mn

Tyto slitiny byly typově vybrány ve spolupráci se společností Al Invest Břidličná a.s.

2.4 Volba vhodného typu průchodu

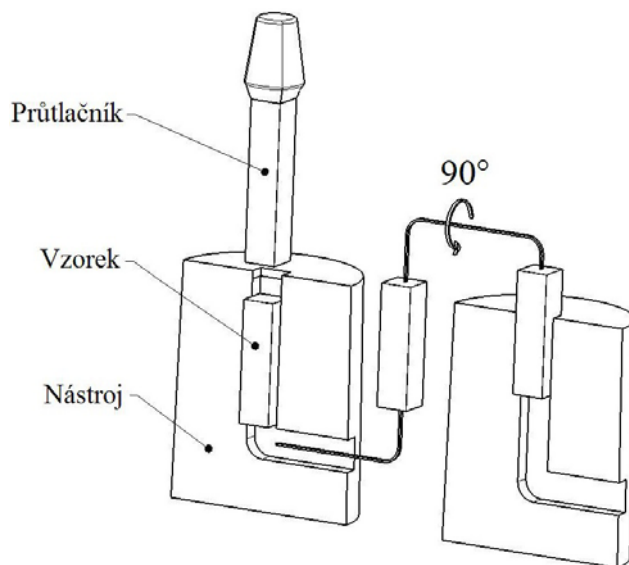
Vysokého plastické přetvoření je závislé na typu průchodu vzorku kanálem ECAP. Nyní jsou obecně známy čtyři odlišné průchody kanálem, které jsou popsány jako průchod typu „A“, typu „B_A“, typu „B_C“ a typu „C“ (viz. kap. 2.1).

2.4.1 Matematické modelování průchodu typu „B_C“ v programu QForm

Daný typ průchodu se jeví dle doposud získaných poznatků a provedených analýz i experimentálního ověřování jako nejvhodnější. Vzorek je otáčen mezi každým průchodem o 90° ve stejném směru (viz obr. 2.5). Dochází ke kumulaci střížných pásem v celém objemu protlačovaného vzorku. Intenzivní plastická deformace dosažená vysokým stupněm

přetvoření vede ke značnému rozdrobení zrna. Pro stejnou velikost deformace je u tohoto typu průchodu zapotřebí nejmenšího počtu protlačení. Při průchodu typu „Bc“ se vyskytují čtyři odlišné roviny svírající úhel 120° .

Tento proces, kde je vzorek otáčen v pořadí 90° , 180° , 270° , 360° atd. dříve stanovený typ průchodu „Bc“ v detailním zkoumání mikrostruktury se projevil jako optimální pro dosažení tvárných malých velikostí zrn s vysokými úhly hranic zrn [11].



Obr. 2.5 Průchod typu „Bc“

2.5 Navržené geometrie tvářecího nástroje ECAP

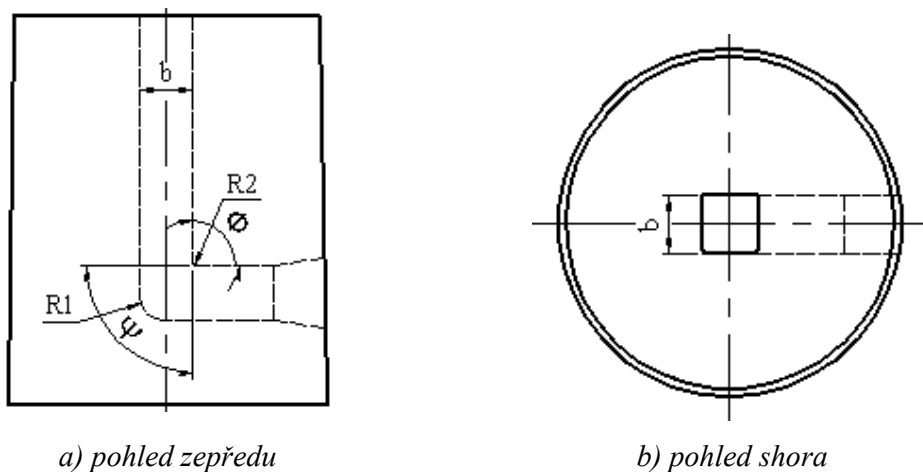
Při návrhu nástrojů pro technologii ECAP vycházím ze získaných zkušeností s procesem a rovněž jsem se soustředil na změnu cesty deformace, což umožní podstatného docílení pro zvýšení stupně deformace materiálu už v prvním průchodu kanálem tvářecího nástroje.

Hlavním úkolem matematické simulace technologie ECAP je protlačení vzorku slitin AlMn1Cu a AlFe1,5Mn kanálem v nástroji o šířce b přes poloměry $R1$ a $R2$. Daná geometrie kanálu byla navržena z hlediska potřeby využití vícenásobného protlačování.

Opracovaný vzorek je vložen do kanálu tvaru „L“. Pro případ kdy úhel mezi dvěma částmi „L“ matrice se rovná 90° , vzorek je namáhán na střih v okamžiku přechodu z jedné části do druhé. Je zřejmé, že nedochází k jakékoliv změně rozměrů v příčném průřezu při protlačení vzorků kanálem (viz. obr. č. 2.5)

2.5.1 Geometrie klasického kanálu

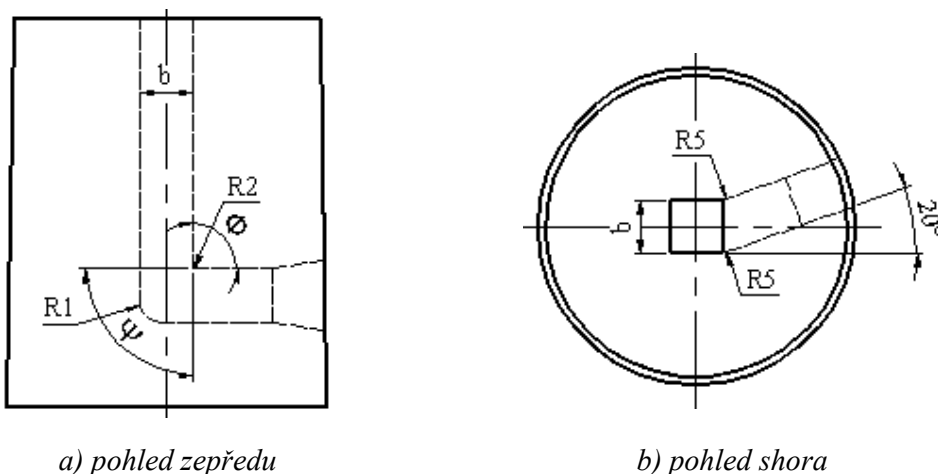
Jako klasickou geometrii nástroje (viz obr. č. 2.6) je použit vnější poloměr $R2 = 4$ mm, vnitřní poloměr $R2 = 0,5$ mm, šířka kanálu $b = 10$ mm, vnější úhel $\Psi = 90^\circ$ a vnitřní úhel $\Phi = 90^\circ$. Výstupní kanál je na konci upraven o rozšířenou část. Toto odlehčení může pomoci snížit tlaky působící na nástroj a s ním spojené potíže při konstrukci, tak jako ulehčení manipulace se vzorkem a opětovné protlačování nástrojem.



Obr. 2.6 Nástroj ECAP s klasickou geometrií

2.5.2 Geometrie kanálu s vyosením horizontální části nástroje o 20°

Byl použit nástroj se stejnou geometrií jako u konvenčně konstruovaného kanálu ($R1 = 4$ mm, $R2 = 0,5$ mm, $\Psi = 90^\circ$ a $\Phi = 90^\circ$), ale při napojení horizontálního a vertikálního kanálu je výstupní kanál nástroje vychýlen o 20° a pro zmenšení tření použito zaoblení $R5 = 5$ mm. Na výstupu je kanál upraven o rozšířenou část jako u klasické geometrie nástroje. Jak je zobrazeno na obrázku č. 2.7.



Obr. 2.7 Nástroj ECAP s vychýlenou výstupní částí o 20°

2.6 Protlačování za rozdílných teplot

Plastická deformace představuje složitý proces závislý na velkém počtu faktorů, jako je teplota deformace T , zvláště ve vztahu k teplotě tavení T_t na střední velikosti zrna d , rychlosti deformace, velikosti napětí především ve vztahu k velikosti modulu pružnosti.

Závisí také na hustotě strukturních poruch (především dislokací), na čistotě materiálu a dalších faktorech. Deformace realizovaná technologií ECAP za studena významně závisí na posledně jmenovaných činitelích [7].

Dle doposud získaných poznatků a provedených analýz, matematická simulace při teplotě 350 °C nevykazovala prakticky žádnou změnu hodnoty velikosti deformace od velikosti hodnoty deformace při teplotě 20 °C. Daná teplota odpovídá teplotě kontinuálně odlitého pásu plechu (vstupního polotovaru pro další zpracování válcováním) v podniku Al Invest Břidličná. Z tohoto hlediska jako vhodnou teplotu pro samotnou simulaci protlačování volím $T = 20$ °C.

2.7 Zadané parametry pro vlastní simulace matematického modelování

Zadané okrajové podmínky

Okrajové podmínky slouží k přesnějšímu popisu daného prostředí při průběhu tvářecí operace. Tyto podmínky se zadávají do programu QForm při vytváření objektů dané sestavy.

▪	teplota vzorku	$T_v = 20$ °C
▪	teplota nástrojů	$T_n = 20$ °C
▪	teplota okolí	$T = 20$ °C
▪	materiál matrice	19 552
▪	materiál vzorku	AlMn1Cu, AlFe1,5Mn
▪	mazivo	Minerální olej pro studené deformace hliníkových slitin – mo-al-c
▪	koeficient tření	0.05
▪	protlačovací rychlost	$v = 0,5$ mm.s⁻¹
▪	hydraulický lis	DP 1600

Výpočet rychlosti deformace pro vzorek $l = 38$ mm

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dl}{l} \right) = \frac{d}{l} \left(\frac{dl}{dt} \right) = \frac{v}{l} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (2.1)$$

Zadané parametry:

v.....0,7 mm.s⁻¹ $h_k \cong l$38 mm

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{l} = \frac{0,7}{38} = 0,018 \text{ s}^{-1} \quad (2.2)$$

Výpočet rychlosti deformace pro vzorek $l = 68$ mm

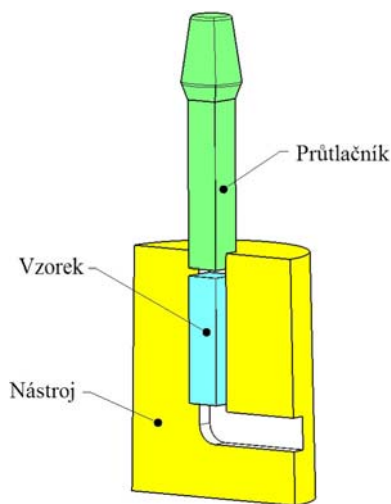
Zadané parametry:

v.....0,7 mm.s⁻¹ $h_k \cong l$68 mm

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{l} = \frac{0,7}{68} = 0,01 \text{ s}^{-1} \quad (2.3)$$

Výpočet potvrdil teoretický předpoklad, že průměrná deformační rychlost se u procesu ECAP pro dané slitiny pohybuje v rozmezí $\dot{\varepsilon} = (1.10^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ až } 5.10^{-1} \text{ s}^{-1})$.

Po zadání materiálu se volí a definuje geometrie polotovaru pro protlačovací zkoušky. Důležité je vytvořit vzorek jen pro první průchod neboť pro další průchody umožňuje program QForm převzít vzorek s dosaženými parametry tváritelnosti po předchozí operaci. Dalším krokem bylo vytvoření nástrojů. Při simulaci mají nástroje jednoduchý tvar, který byl vytvořen v programu Inventor (viz. obr. 2.8).

**Obr. 2.8** Schéma sestavy (průřez nástrojem ECAP)

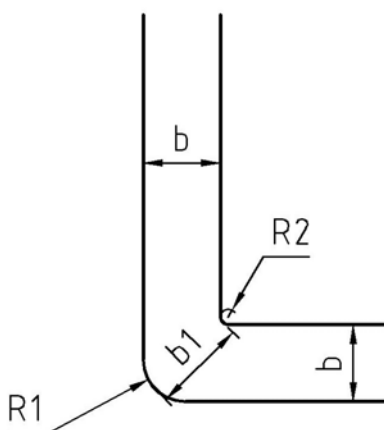
Nástrojům byl přiřazen předem definovaný materiál z databáze programu, zároveň byly nástrojům přiřazeny i počáteční teploty a síť. Tímto jsem mohl přikročit k vytvoření sestavy dané operace, k přiřazení kontaktních podmínek, pohybů, pohybových událostech a mohla být spuštěna vlastní simulace.

2.8 Analýza matematického modelování technologie ECAP při jednom a více průchodech

Hlavním cílem dané etapy bylo provedení analýzy matematického modelování technologie ECAP pro vzorky slitin hliníku, protlačovaného matricí o stejných poloměrech zaoblení matrice $R1$ a $R2$ o konstantním průřezu kanálu $b \times b = 10 \times 10$ mm, ale rozdílné geometrii nástrojů. Tento rozměr neplatí pro šířku kanálu mezi napojením jeho vertikální a horizontální části – označení $b1$ (viz. obr. 2.9). Abychom dodrželi konstantní šířku kanálu, musí středy přechodů vycházet z jednoho bodu. Při dodržení této podmínky, vznikají velké poloměry přechody kanálu nástroje. Tyto parametry geometrie nástroje musí být zachovány i při nástroji s větším počtem kanálů (vnější a vnitřní poloměry a úhly), čímž jsou zajištěny stejné podmínky protlačování (viz. obr. 2.9).

S využitím programu MathCad byl optimalizován rozsah velikostí poloměrů zaoblení a úhlů kanálů ECAP pro slitiny AlMn1Cu a AlFe1,5Mn.

$$R_1 = 4 \text{ mm}, R_2 = 0,5 \text{ mm}, \phi = 90^\circ, \psi = 90^\circ$$



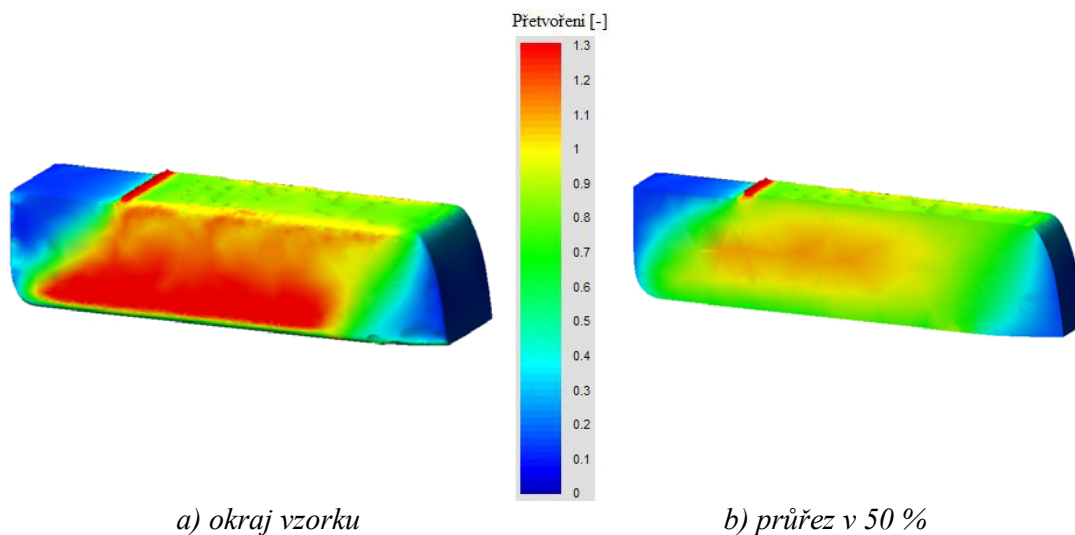
Obr. 2.9 Parametry kanálu ECAP – vnější poloměr $R1$, vnitřní poloměr $R2$, šířka kanálu b , šířka kanálu mezi zaoblením $b1$

2.9 Vyhodnocování výsledků simulace

Výsledky jsou vyhodnocovány v programu QForm po dokončení simulace. Při prostorovém tváření, tak jako v reálu, je materiál heterogenní a nechová se v celém průřezu konstantně. Intenzita deformace je na okraji vzorku podstatně větší, způsobená třením mezi nástrojem a vzorkem. Výsledky simulace jsou proto graficky zobrazovány v 50 % průřezu vzorkem.

Intenzita deformace

Porovnáním intenzity deformace pro poloměry $R_1 = 4 \text{ mm}$, $R_2 = 0,5 \text{ mm}$, s úhly nástroje $\phi = 90^\circ$ a $\psi = 90^\circ$, bylo jednoznačně prokázáno, že na okraji vzorku kde dochází ke styku s nástrojem (viz. obr. 2.10 a) je pásmo deformace výrazně větší než při průřezu vzorkem v polovině jeho šířky po protlačení (viz. obr. 2.10 b), při stejné hodnotě intenzity deformace $\underline{\varepsilon_i = 1,3}$. Projevuje se vliv tření.



Obr. 2.10 Srovnání intenzity deformace

3 SIMULACE PROTLAČOVÁNÍ KANÁLEM ECAP A VLIV POČTU PRŮCHODŮ NA DOSAŽENÝ STUPEŇ DEFORMACE

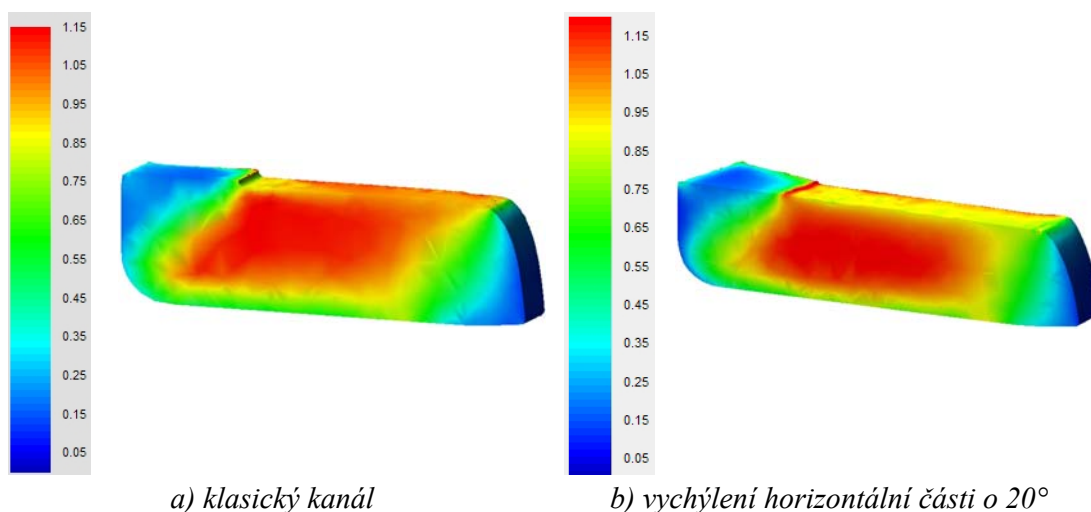
3.1 Matematické modelování průchodu slitiny AlMn1Cu s klasickým a vychýleným kanálem v horizontální části o 20°

V této kapitole se zabývám protlačováním slitiny AlMn1Cu a to jak klasickým nástrojem tak nástrojem s vychýlenou výstupní částí o 20°.

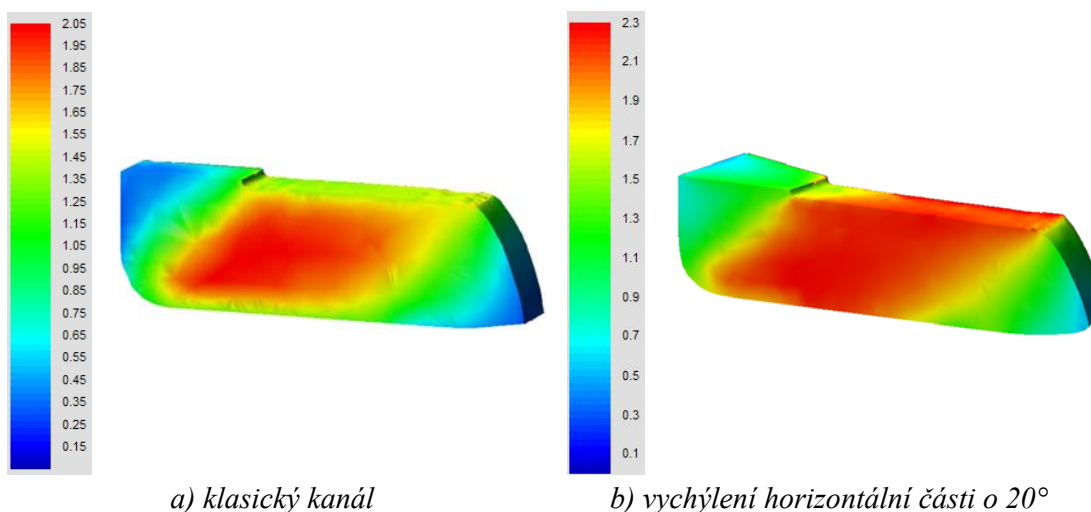
Geometrie nástroje má stejné poloměry zaoblení $R1 = 4$ mm a $R2 = 0,5$ mm i úhly kanálu o velikosti $\phi = 90^\circ$ a $\psi = 90^\circ$. Rozdílná je geometrie výstupní části, kde je nástroj upraven o vyosení horizontální části kanálu úhlem 20° s poloměrem $R5 = 5$ mm. U obou nástrojů je výstupní kanál na konci upraven o rozšířenou část, tak aby odlehčení pomohlo snížit tlaky působící na nástroj.

3.1.1 Intenzita deformace

Intenzita deformace s geometrií klasického kanálu dosahuje po prvním průchodu maximální hodnoty $\underline{\varepsilon_i} \approx 1,1$. Výsledná intenzita deformace pro nástroj s vyosením výstupní části o 20° nabývá po prvním průchodu maximální hodnoty $\underline{\varepsilon_i} \approx 1,2$. Průběhy intenzity deformace jsou uvedeny na obr. 3.1.



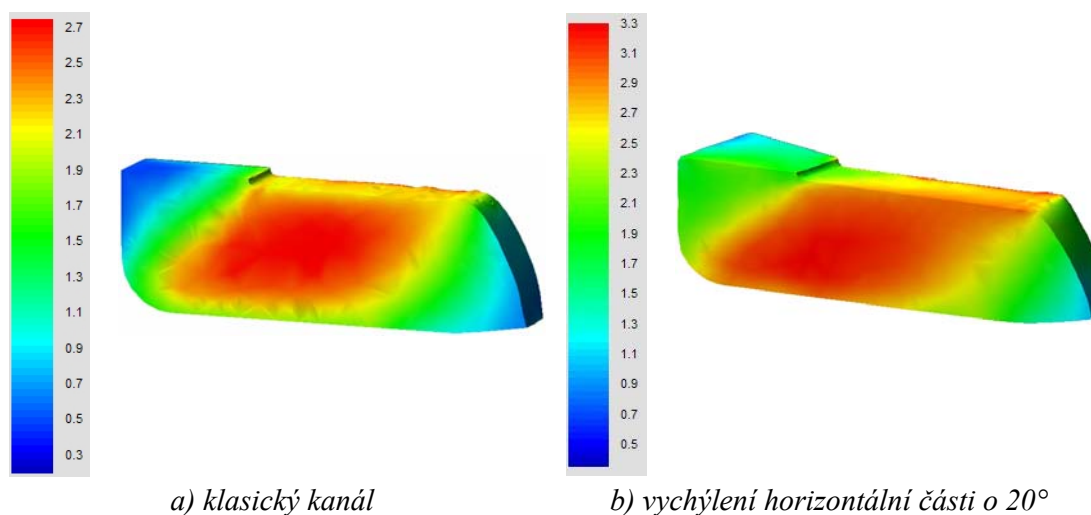
Obr. 3.1 Průběhy intenzity deformace po prvním průchodu



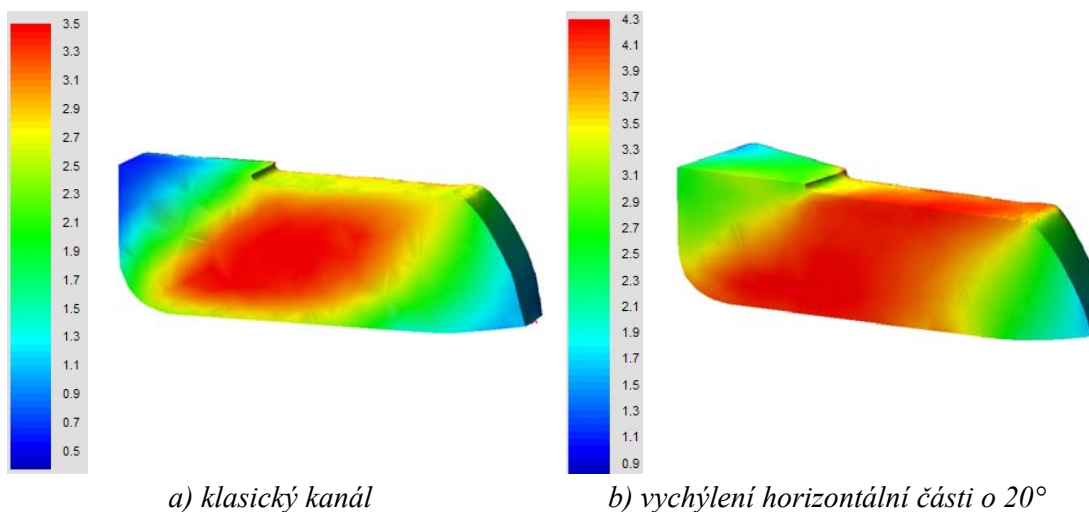
Obr. 3.2 Průběhy intenzity deformace po druhém průchodu

Velikost intenzity deformace při použití nástroje s klasickou geometrií po druhém průchodu je $\underline{\epsilon_i \approx 2,05}$ (viz. obr. 3.2 a) a po třetím průchodu $\underline{\epsilon_i \approx 2,75}$ (viz. obr. 3.3 a).

Výsledná hodnota intenzity deformace pro vychýlený kanál dosahuje po druhém průchodu nástrojem maximální hodnoty $\underline{\epsilon_i \approx 2,3}$ (viz. obr. 3.2 b) a $\underline{\epsilon_i \approx 3,3}$ (viz. obr. 3.3 b) po třetím průchodu nástrojem ECAP. Při druhém a třetím průchodu již dochází ke značným rozdílům výsledné hodnoty intenzity deformace.



Obr. 3.3 Průběhy intenzity deformace po třetím průchodu

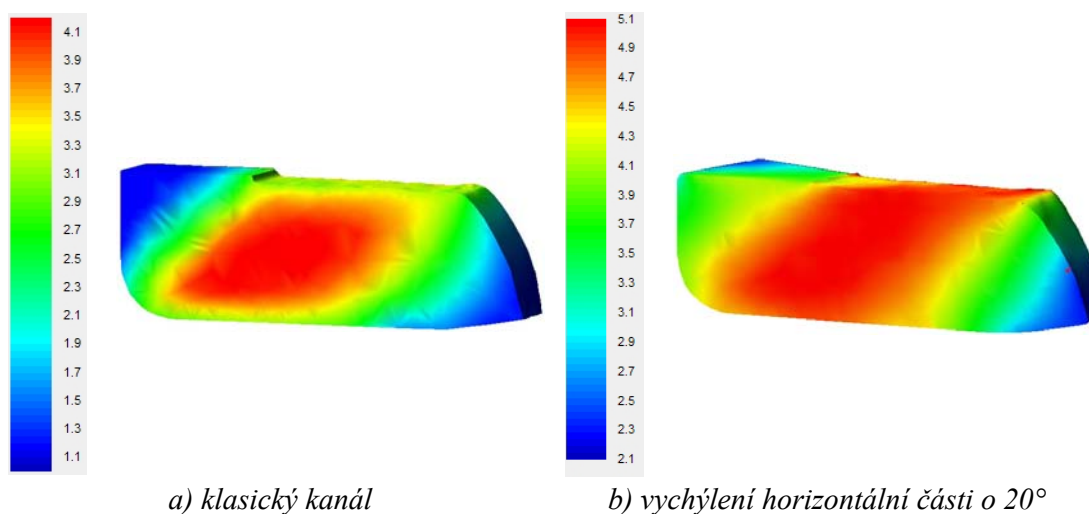


Obr. 3.4 Průběhy intenzity deformace po čtvrtém průchodu

Čtvrtý a pátý průchod kanálem je významně rozdílný jak v hodnotách maximální dosažené intenzity deformace, tak i v jejím průběhu napříč průřezem vzorku, kde při geometrii nástroje s vychýlenou horizontální částí kanálu je pásmo deformace výrazně větší.

Maximální intenzita deformace dosahuje po čtvrtém průchodu hodnoty $\underline{\epsilon_i \approx 3,5}$ (viz. obr. 3.4 a) a po pátém průchodu $\underline{\epsilon_i \approx 4,2}$ (viz. obr. 3.5 a) při klasické geometrii kanálu.

Po čtvrtém a pátém průchodu nástrojem s vychýleným kanálem dosahuje intenzita deformace hodnot $\underline{\epsilon_i \approx 4,3}$ (viz. obr. 3.4 b) a $\underline{\epsilon_i \approx 5,1}$ (viz. obr. 3.5 b).



Obr. 3.5 Průběhy intenzity deformace po pátém průchodu

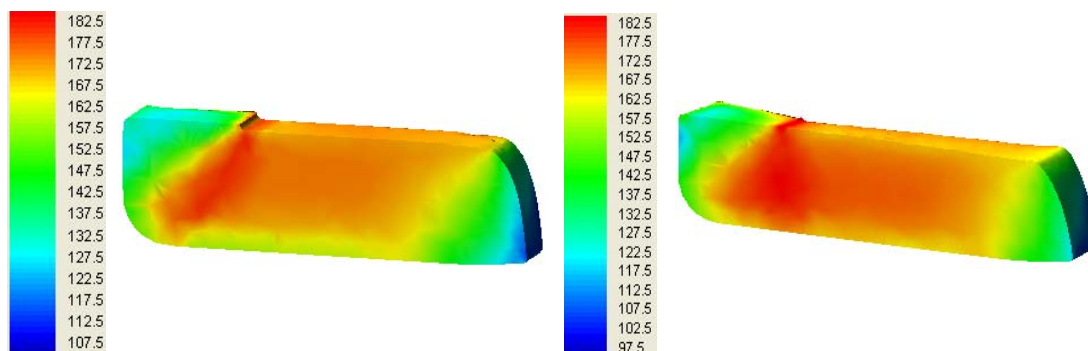
Výsledky modelování potvrdily předpoklad vysoké vstupní deformace ($\varepsilon = 1 \sim 1,1$) dosažené po prvním průchodu kanálem ECAP, které je z hlediska vymezení napěťového stavu, umožňujícího potřebné rozdrobení struktury v dalších průchodech, velmi významné. Výsledné průběhy intenzity deformace jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Dosažené hodnoty intenzity deformace slitiny AlMn1Cu

Počet průchodů	Intenzita deformace [-] klasický kanál	Intenzita deformace [-] vychýlení o 20°
1	1,1	1,2
2	2,05	2,3
3	2,75	3,3
4	3,5	4,3
5	4,2	5,1

3.1.2 Deformační napětí

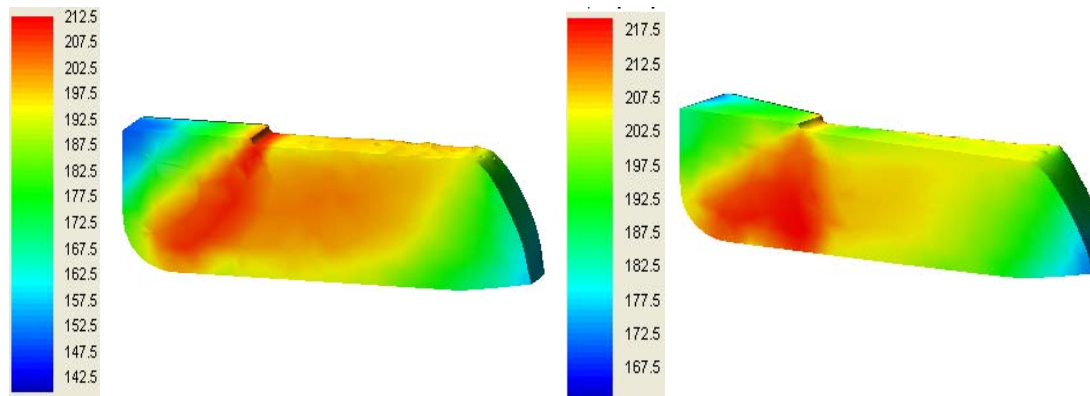
Výsledná hodnota deformačního napětí $\sigma_i = 182,5$ MPa po prvním průchodu je pro oba kanály téměř identická. Je prokázána větší homogenita rozložení deformačního napětí po celé délce vzorku. Průběhy deformačního napětí po prvním průchodu jsou uvedeny na obr. 3.6.



a) klasický kanál

b) vychýlení horizontální části o 20°

Obr. 3.6 Průběhy deformačního napětí po prvním průchodu



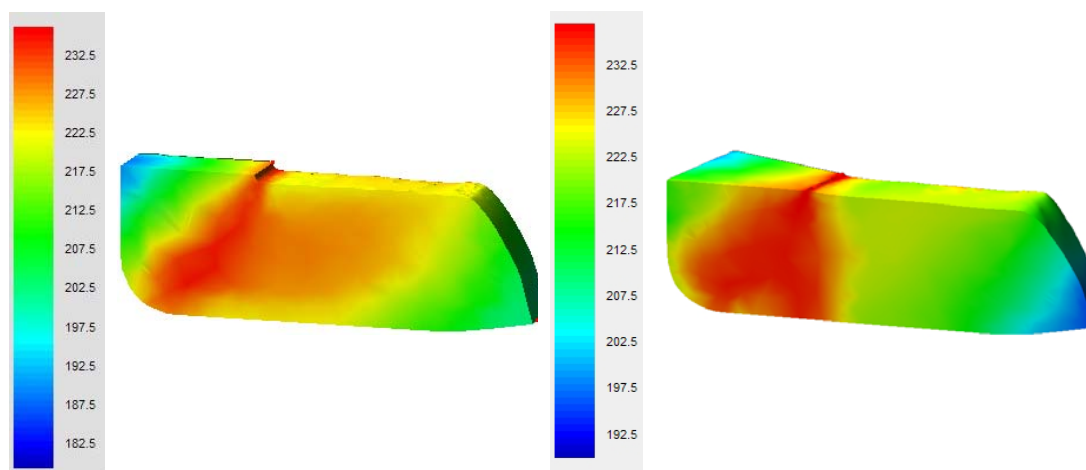
a) klasický kanál

b) vychýlení horizontální části o 20°

Obr. 3.7 Průběhy deformačního napětí po třetím průchodu

Deformační napětí pro klasickou geometrii nástroje $R1 = 4 \text{ mm}$, $R2 = 0,5 \text{ mm}$ a úhly $\phi = 90^\circ$, $\psi = 90^\circ$ dosahuje po třetím průchodu maximální hodnoty $\underline{\sigma_i = 212,5 \text{ MPa}}$. Pro upravenou geometrii nástroje s vychýlením výstupního kanálu o 20° dosahuje zvýšení této hodnoty o zanedbatelných 5 MPa, tj. $\underline{\sigma_i = 217,5 \text{ MPa}}$ (viz. obr. 3.7).

V pátém průchodu kanálem se deformační napětí dále zvětšuje a dosahuje maxima $\underline{\sigma_i = 235 \text{ MPa}}$ pro klasickou geometrii nástroje a $\underline{\sigma_i = 237 \text{ MPa}}$ při upravené geometrii nástroje ECAP. Průběhy deformačního napětí po pátém průchodu jsou uvedeny na obrázku 3.8 a) a 3.8 b).



a) klasický kanál

b) vychýlení horizontální části o 20°

Obr. 3.8 Průběhy deformačního napětí po pátém průchodu

Nejvyšší hodnota deformačního napětí byla dosažena ve střížné rovině přechodu mezi poloměry $R1$ a $R2$ v souladu s teoretickými předpoklady (viz. obr. 3.6, 3.7 a 3.8).

Změna geometrie nástroje oproti standardní koncepci nevyvolala výraznou změnu deformačního napětí. Deformační napětí se mezi prvním a pátým průchodem zvětšilo o 55 MPa. Z počátečních 182,5 MPa při prvním průchodu, shodných u obou geometrií nástroje, na konečných 237 MPa. Přičemž růst deformačního napětí je v souladu s teoretickými předpoklady a experimentálními zkouškami.

Dosažené hodnoty deformačního napětí vycházejí ze vstupních křivek přetvárného odporu. Hodnoty deformačního napětí pro obě geometrie nástroje se vzorkem s materiálem AlMn1Cu jsou uvedeny v tabulce 3.2.

Tab. 3.2 Dosažené hodnoty deformačního napětí u slitiny AlMn1Cu

Počet průchodů	Deformační napětí [MPa] klasický kanál	Deformační napětí [MPa] vychýlení o 20°
1	182,5	182,5
3	212,5	217,5
5	235	237

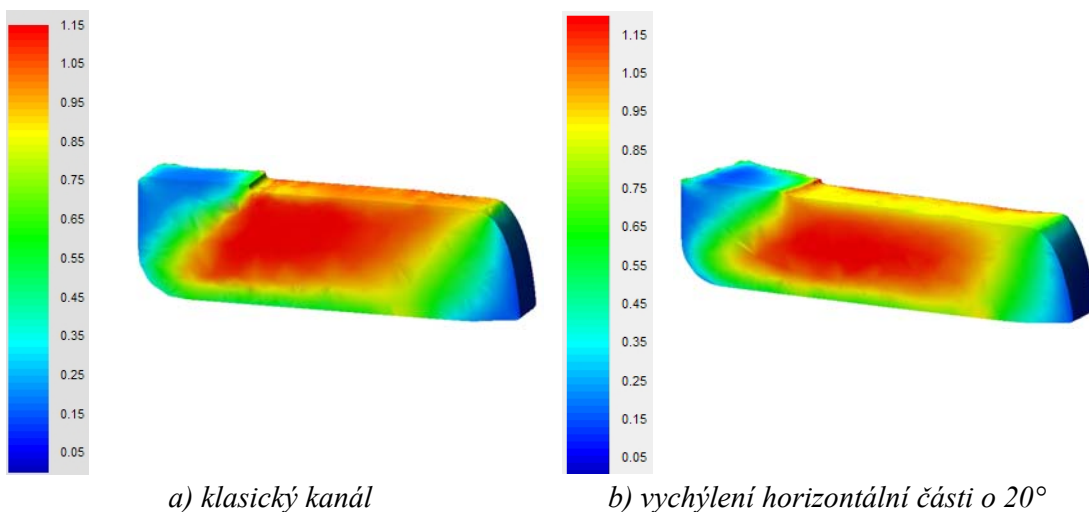
3.2 Matematické modelování průchodu slitiny AlFe1,5Mn s klasickým a vychýleným kanálem v horizontální části o 20°

Hlavním cílem dané etapy je rozbor matematického modelování technologie ECAP protlačováním vzorku slitiny AlFe1,5Mn a to jak klasickým nástrojem tak nástrojem s upravenou geometrií provedenou vychýlením výstupní části o 20°.

Geometrie nástroje má stejné poloměry zaoblení $R1 = 4$ mm a $R2 = 0,5$ mm i úhly kanálu o velikosti $\phi = 90^\circ$ a $\psi = 90^\circ$. Rozdílná je geometrie výstupní části, kde je nástroj upraven vychýlením horizontální části o úhel 20° a poloměrem $R5 = 5$ mm. U obou nástrojů je výstupní kanál na konci upraven o rozšířenou část, tak aby odlehčení pomohlo snížit tlaky působící na nástroj a aby měly oba nástroje stejné podmínky při protlačování.

Výsledky simulací jsou obdobné jako u simulace slitiny AlMn1Cu s ohledem na použití stejné nástrojové základny a parametrů protlačování. Jedná se hlavně o vliv chemického složení.

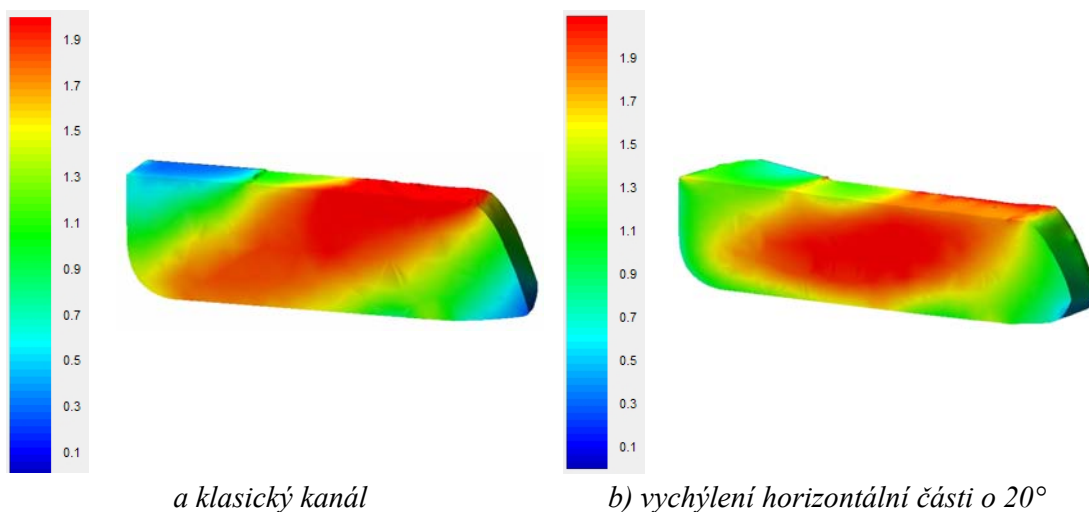
3.2.1 Intenzita deformace



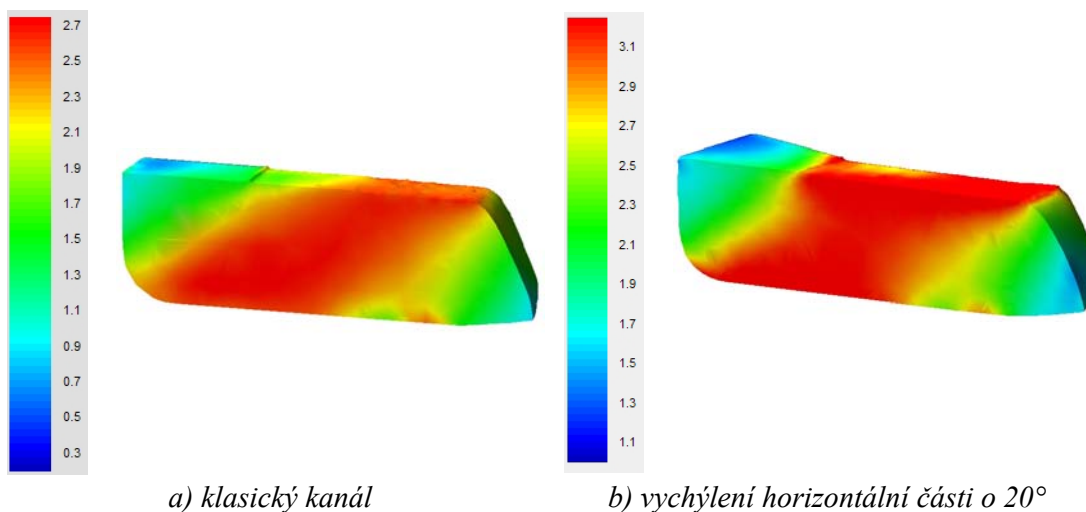
Obr. 3.9 Průběhy intenzity deformace po prvním průchodu

Velikost intenzity deformace při protlačování nástrojem ECAP s konvenční geometrií po prvním průchodu je $\underline{\varepsilon_i} \approx 1,1$ (viz. obr. 3.9 a) a po druhém průchodu $\underline{\varepsilon_i} \approx 2$ (viz. obr. 3.10 a).

Výsledná hodnota intenzity deformace pro vychýlený kanál dosahuje po prvním průchodu nástrojem maximální hodnoty $\underline{\varepsilon_i} \approx 1,2$ (viz. obr. 3.9 b) a $\underline{\varepsilon_i} \approx 2,1$ (viz. obr. 3.10 b) po druhém průchodu nástrojem ECAP. Výsledné hodnoty intenzity deformace u upraveného nástroje jsou v porovnání s klasickou geometrií vyšší jak v prvním, tak druhém průchodu.



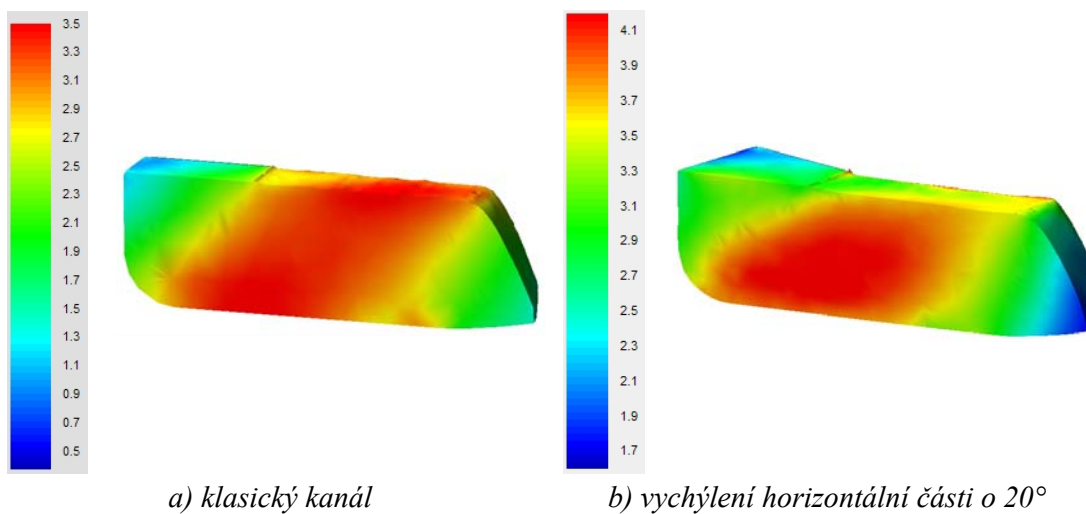
Obr. 3.10 Průběhy intenzity deformace po druhém průchodu



Obr. 3.11 Průběhy intenzity deformace po třetím průchodu

Ve třetím průchodu kanálem se intenzita deformace dále zvětšuje a dosahuje maxima na hodnotách $\underline{\varepsilon_i} \approx 2,7$ pro klasickou geometrii nástroje a hodnotě $\underline{\varepsilon_i} \approx 3,25$ s upravenou geometrií nástroje ECAP. Průběhy intenzity deformace po třetím průchodu jsou uvedeny na obrázku 3.11 a) a 3.11 b).

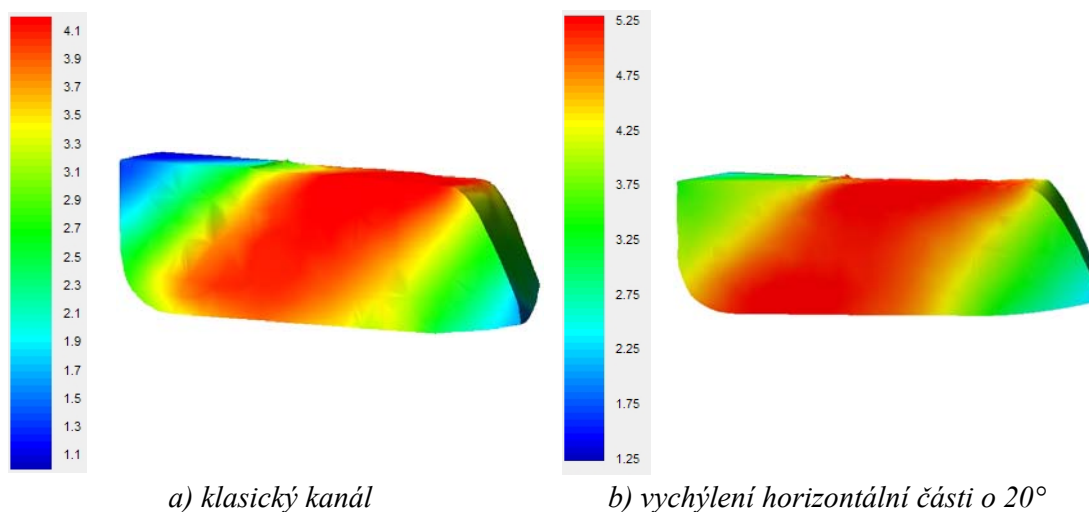
Intenzita deformace pro klasickou geometrii nástroje s poloměry $R1 = 4 \text{ mm}$, $R2 = 0,5 \text{ mm}$ a úhly kanálu $\phi = 90^\circ$ a $\psi = 90^\circ$, dosahuje po čtvrtém průchodu maximální hodnoty $\underline{\varepsilon_i} \approx 3,6$ (viz. obr. 3.12 a). Pro upravenou geometrii nástroje s vychýlenou výstupní částí o 20° dosahuje hodnoty $\underline{\varepsilon_i} \approx 4,2$ (viz. obr. 3.12 b). Při třetím a čtvrtém průchodu již dochází ke značným rozdílům výsledné hodnoty intenzity deformace.



Obr. 3.12 Průběhy intenzity deformace po čtvrtém průchodu

Po pátém průchodu se dosažené hodnoty zpevnění značně liší vzhledem ke geometrii nástroje. S klasickou geometrií kanálu dosahuje hodnota intenzity deformace maximální velikosti $\underline{\varepsilon_i} \approx 4,2$ (viz. obr. 3.13 a) a $\underline{\varepsilon_i} \approx 5,3$ s vychýlením o 20° .

Finální průběh intenzity deformace po pátém průchodu se slitinou AlFe1,5Mn s oběma použitými geometriemi jsou uvedeny na obrázku 3.13 a) a 3.13 b).



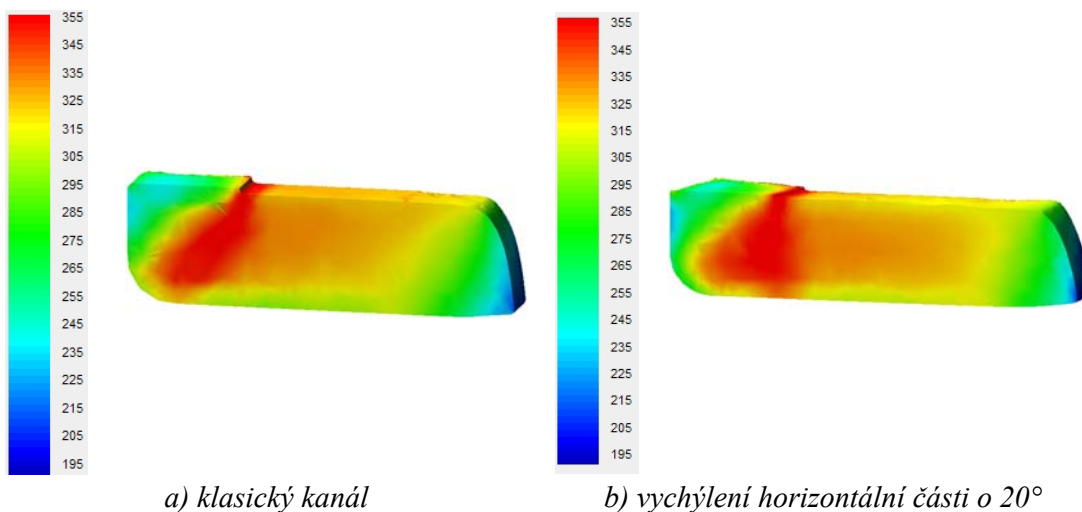
Obr. 3.13 Průběhy intenzity deformace po pátém průchodu

Cílem úpravy geometrie kanálu ECAP je snížení počtu průchodů pro dosažení zjemnění struktury, což se prokázalo použitím nástroje s vychýlenou horizontální částí kanálu o 20° . Při této úpravě výsledná intenzita deformace po čtvrtém průchodu dosahuje stejné velikosti jako po pátém průchodu při protlačování s klasickou geometrií nástroje. Výsledné hodnoty intenzity deformace jsou uvedeny v tab. 3.3.

Tab. 3.3 Dosažené hodnoty intenzity deformace slitiny AlFe1,5Mn

Počet průchodů	Intenzita deformace [-] klasický kanál	Intenzita deformace [-] vychýlení o 20°
1	1,1	1,2
2	2	2,1
3	2,7	3,25
4	3,6	4,2
5	4,2	5,3

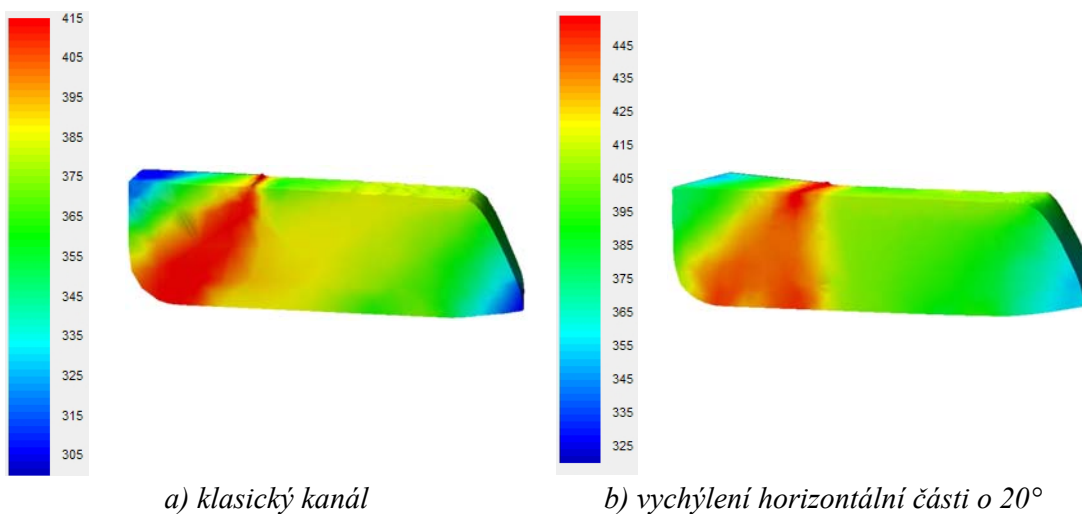
3.2.2 Deformační napětí



Obr. 3.14 Průběhy deformačního napětí po prvním průchodu

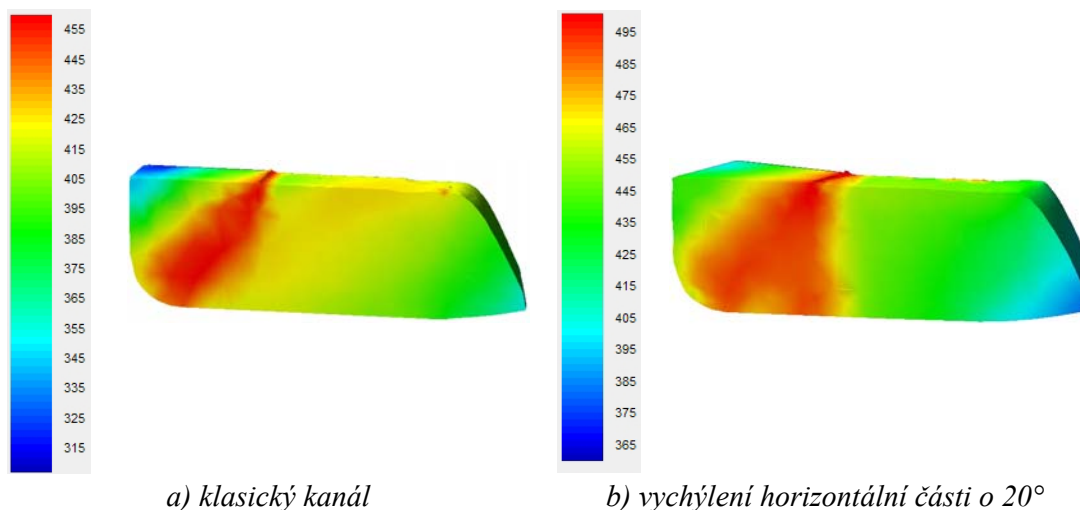
Velikost deformačního napětí při použití nástroje s klasickou geometrií v prvním průchodu nástrojem dosahuje velikosti $\underline{\sigma_i = 355}$ MPa (viz. obr. 3.14 a) a ve třetím průchodu $\underline{\sigma_i = 415}$ MPa (viz. obr. 3.15 a).

Maximální hodnota deformačního napětí pro vychýlený kanál o 20° dosahuje v prvním průchodu nástrojem finální hodnoty $\underline{\sigma_i = 355}$ MPa (viz. obr. 3.14 b) a $\underline{\sigma_i = 454}$ MPa (viz. obr. 3.15 b) ve třetím průchodu nástrojem ECAP. Mezi prvním a třetím průchodem narostlo deformační napětí o 100 MPa při protlačování s upravenou geometrií nástroje.



Obr. 3.15 Průběhy deformačního napětí po třetím průchodu

V pátém průchodu kanálem se deformační napětí dále zvětšuje a dosahuje maxima $\sigma_i = 460$ MPa pro klasickou geometrii nástroje a $\sigma_i = 501$ MPa při upravené geometrii nástroje ECAP. Průběhy deformačního napětí po pátém průchodu jsou uvedeny na obrázku 3.8 a) a 3.8 b).



Obr. 3.16 Průběhy deformačního napětí po pátém průchodu

Při prvním protlačování kanálem je hodnota deformačního napětí shodná u obou použitých geometrií. Ve třetím průchodu se výsledek liší o 40 MPa podobně jako v pátém průchodu, když s úpravou geometrie dosahuje deformační napětí vyšších hodnot. Dosažené hodnoty deformačního napětí pro obě geometrie nástroje jsou uvedeny v tabulce 3.4.

V tabulce vidíme hodnoty deformačního napětí, které se zvyšuje jako intenzita deformace na základě počtu průchodů. Deformační napětí je také závislé na úpravě nástroje jak je zobrazeno v tabulce. Při použití slitiny AlFe1,5Mn již dochází ke značným rozdílům v dosažených velikostech deformačního napětí. Deformační napětí je závislé na úpravě geometrie kanálu nástroje ECAP, jak je uvedeno v tabulce.

Tab. 3.4 Dosažené hodnoty deformačního napětí u slitiny AlFe1,5Mn

Počet průchodů	Deformační napětí [MPa] klasický kanál	Deformační napětí [MPa] vychýlení o 20°
1	356	357
3	415	454
5	460	501

3.3 Vliv počtu průchodů na velikost deformačně-napět'ového stavu u zadaných slitin

Tato část práce je zaměřena na porovnání dosažených dílčích výsledků z hlediska různé geometrie nástroje a porovnání vhodnosti zadaných slitin k dosažení co nejvyššího stupně deformace.

Z průběhů velikosti intenzity deformace bylo prokázáno, že hodnoty ε_i mají na základě počtu průchodů rostoucí charakter. Dle výsledných hodnot intenzity deformace po jednotlivých průchodech dochází ke kumulaci deformačního zpevnění. Každý další průchod kanálem ECAP vede k výraznému zjemnění průměrné velikosti zrna. Daný závěr je potvrzen metalografickou analýzou, která není zahrnuta v mé diplomové práci.

Z legend simulací je zřejmé, že i nejnižší hodnota intenzity deformace na okrajích vzorku, kde dochází k horšímu či minimálnímu přetvoření je u upravené geometrie nástroje s vychýlenou horizontální částí vyšší než u klasického konceptu nástroje ECAP.

Deformační napětí je při použití slitiny AlFe1,5Mn o 173,5 MPa vyšší než protlačování se slitinou AlMn1Cu. Vyšší deformační napětí u slitiny AlFe1,5Mn oproti AlMn1Cu je i v posledním pátém průchodu a to o 225 MPa u klasické geometrie nástroje a 264 MPa u nástroje s vychýlenou výstupní částí. Dosažené hodnoty deformačního napětí vycházejí ze vstupních křivek přetvárného odporu nezpevněných slitin AlMn1Cu a AlFe1,5Mn.

3.4 Porovnání výsledků intenzity deformace s výsledky dosaženými programem FormFEM

Vlastní výsledky simulací procesu ECAP, protlačováním slitiny AlCu4Mg2 v programu QForm, byly porovnány s dosaženými výsledky matematického modelování slitiny AlCu4Mg2, které byly prováděny na katedře mechanické technologie v programu FormFEM, jenž pracuje pouze ve 2D prostoru (viz. obr. 3.18). Proto umožňuje provádět matematické simulace pouze pro první průchod vzorku nástrojem a to s klasickou geometrií nástroje. Což dělá tento program dále nevhodným k využívání simulací procesu ECAP.

Program FormFEM je vlastnictvím firmy ITA s. r. o. Je to software pro počítačovou simulaci procesů objemového tváření.

Program dokáže simulovat procesy lisování, volného kování, zápustkového kování, tažení, protlačování, ohýbání, válcování plochých vývalků a protahování za podmínek rotační symetrie nebo rovinné deformace, simulovat procesy tváření za tepla i za studena (pokud plastické deformace výrazně převyšují deformace elastické), počítat teplotní pole ve tváření polotovaru i v nástrojích s uvažováním přestupu tepla do nástrojů a vlivu teploty na deformační vlastnosti materiálu, ve spojení s programem FormMET předvídá mechanické vlastnosti výkovků po tepelném zpracování (kalení s následným popouštěním) [12].

Podmínka nestlačitelnosti:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad (3.1)$$

je splněna pomocí metody Lagrangeových multiplikátorů. Materiál nemá elastické vlastnosti, což limituje použitou formulaci na řešení tváření za vysokých teplot nebo na problémy, kde elastické deformace jsou v porovnání s plastickými zanedbatelné. Teplotní modul vychází z Fourierovy rovnice, jež je řešena odděleně od mechanické části.

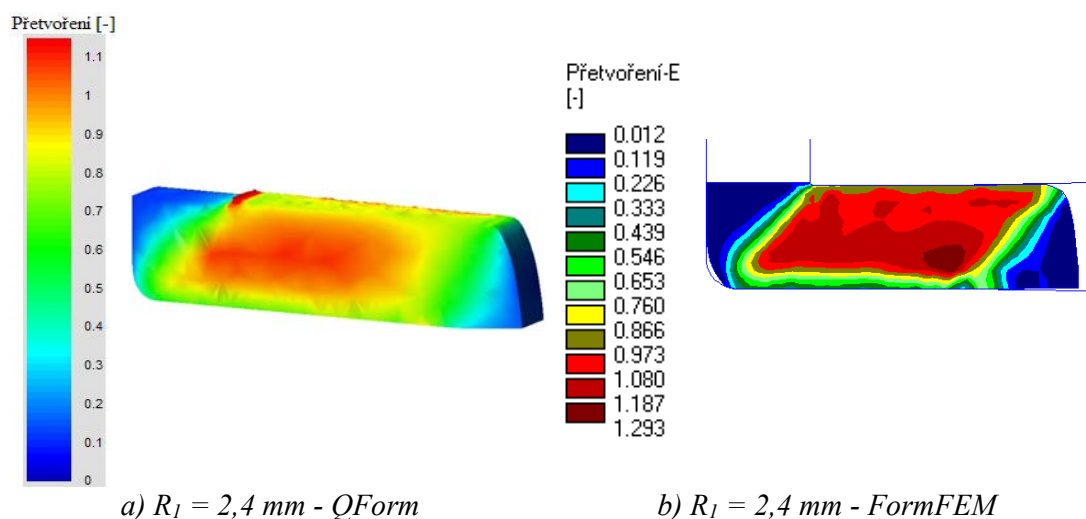
Teplotní vazba je provedena iteračním způsobem. Teplotní modul umožňuje určovat teplotní pole jak v přetvářených tělesech, tak v nástrojích. Vazba mechanického a teplotního výpočtu je vyjádřena vztahem [12].

$$\int \overline{\sigma \varepsilon} dV = q \quad (3.2)$$

Parametry kanálu ECAP

Pro srovnání výsledků simulací byla zvolena tato geometrie kanálu ECAP:

- stejné hodnoty úhlů kanálu $\phi = 90^\circ$ a $\psi = 90^\circ$
- FormFEM: vnější poloměr $R1 = 2,4 \div 5,5 \text{ mm}$ a vnitřní poloměr $R2 = 0,2 \text{ mm}$
- QForm: vnější poloměr $R1 = 2,4 \div 5,5 \text{ mm}$ a vnitřní poloměr $R2 = 0,5 \text{ mm}$

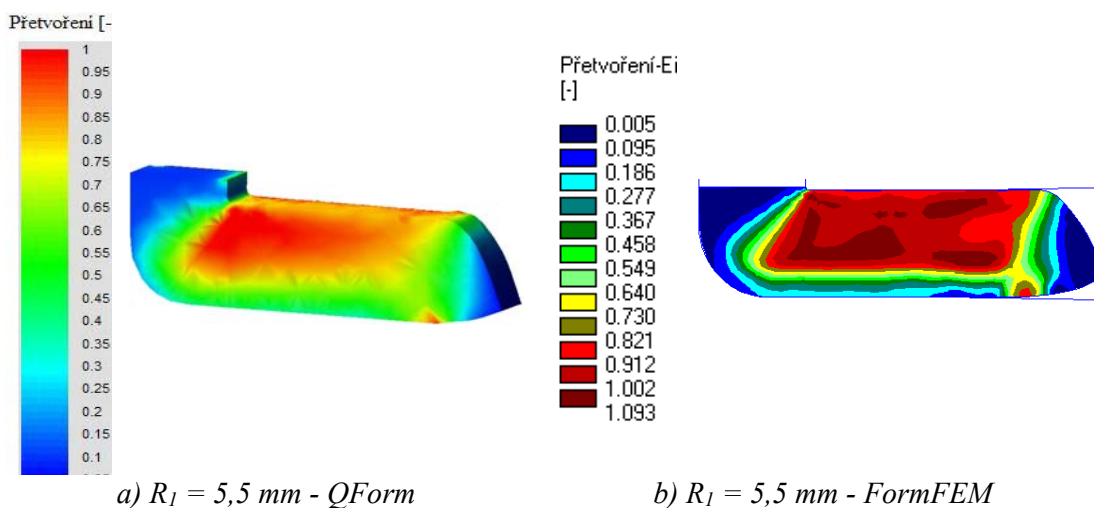


Obr. 3.17 Průběhy intenzity deformace po prvním průchodu

Tab. 3.5 Porovnání dosažených velikostí intenzity deformace

Software	Intenzita deformace [-]
FormFEM	1.293
QForm	1.15

Nejvyšší dosažená hodnota u programu FormFEM je pouze lokálního charakteru, zatímco hodnota dosažená programem QForm má výslednou oblast ve větším průřezu vzorkem. Při srovnání grafických obrazů daných simulací zjistíme minimální odchylky velikosti přetvoření v daném spektru průřezu vzorkem. Dosažené hodnoty intenzity deformace pro různé slitiny a použitý software jsou uvedeny v tab. 3.5.



Obr. 3.18 Průběhy intenzity deformace po prvním průchodu

Tab. 3.6 Porovnání dosažených velikostí intenzity deformace

Software	Intenzita deformace [-]
FormFEM	1.093
QForm	1

Dosažené dílčí výsledky

Dle výsledných grafických obrazů simulací jsou vidět odlišná pole intenzity napětí, která mohou být ovlivněna jak rozdílným grafickým editorem, tak i rozdílným nanášením sítě konečných prvků.

Z dosažených výsledků vyplývá, že bylo docíleno přibližně stejné velikosti deformace u všech variant při prvním průchodu kanálem.

4 ANALÝZA VLIVU ZMĚNY GEOMETRIE NÁSTROJE ECAP NA DOSAŽENÝ STUPEŇ DEFORMACE

Současný technický pokrok vyžaduje vyvíjení nových technologií výroby, které přicházejí jednak vyvíjením nových materiálů, ale také optimalizací produktivity vlastní výroby. Pro co největší možné uplatnění ultra-jemnozrnných materiálů v technické praxi, musí být jejich výrobní proces ekonomicky optimální a technicky proveditelný.

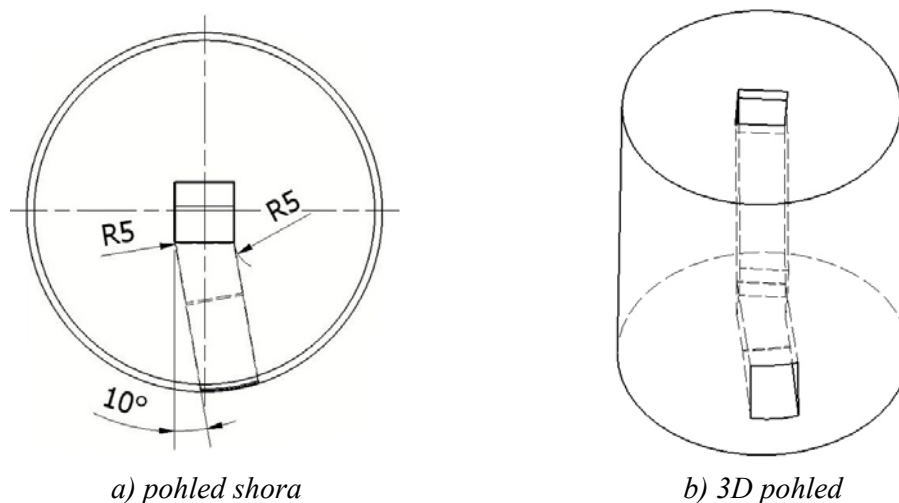
Hlavním cílem dané etapy je provedení analýzy matematického modelování průchodu kanálem nástroje ECAP při změně geometrie nástroje. Návrh nové geometrie nástroje má přinést zvýšení deformačního stupně v prvním průchodu kanálem nástroje ECAP změnou cesty deformace. Snížení počtu průchodů nástrojem ECAP oproti klasickému řešení je velmi významným faktorem z hlediska vývoje dané technologie a dalšího využití v poloprovozní praxi.

Podstata nové koncepce řešení tvářecího nástroje pro vývoj ultra-jemnozrnných materiálů je založena na nové konstrukci kanálu nástroje. Nové konstrukční řešení umožňuje dosažení daleko vyššího stupně přetvoření pomocí změny cesty deformace v jednom a více průchodech nástrojem. Je to nový přístup v konstrukčním řešení tvářecího nástroje než bylo doposud publikováno ve vědecké literatuře zabývající se problematikou výroby nanostrukturních materiálů. Konstrukční úprava se týká horizontálního kanálu, který je vychýlen o 10° a 20° vzhledem k horizontální ose. A také úprava geometrie nástroje zakomponováním šroubovice do kanálu ECAP s pootočením o 30° jak ve vertikální části nástroje, tak i horizontální. Nová koncepce nástroje byla nazvána EHAD - Extrusion with High Amount of Deformation (protlačování s vysokým stupněm deformace).

Pro tyto simulace byla použita slitina AlMn1Cu.

4.1 Konstrukční návrh s vychýlenou výstupní částí protlačovacího nástroje o 10°

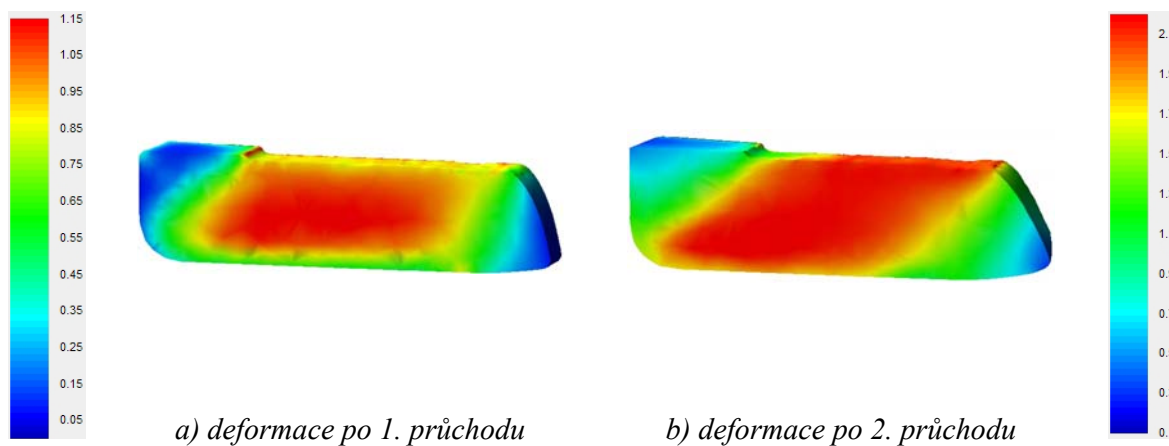
Nástroj má stejnou geometrii jako u standardně konstruovaného kanálu ($R1 = 4$ mm, $R2 = 0,5$ mm, $\Psi = 90^\circ$ a $\Phi = 90^\circ$), avšak horizontální kanál nástroje je vychýlen o 10° (viz. obr. 4.1), přičemž výstupní část má na konci kanálu rozšíření v ose „y“, tak aby odlehčení pomohlo snížit tlaky působící na nástroj a aby měly oba nástroje stejné podmínky při protlačování.



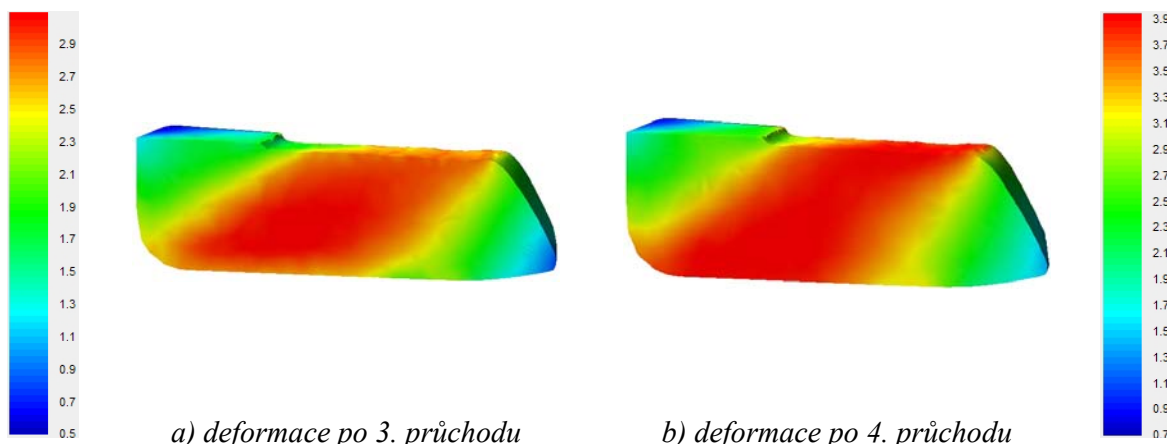
Obr. 4.1 Nástroj ECAP s vyosenou výstupní částí 10°

Intenzita deformace

Výsledná hodnota intenzity deformace pro nástroj s vychýlenou výstupní částí o 10°, poloměry zaoblení $R1 = 4 \text{ mm}$, $R2 = 0,5 \text{ mm}$, $R5 = 5 \text{ mm}$ a úhly nástroje $\phi = 90^\circ$, $\psi = 90^\circ$ dosahuje v prvním průchodu maximální hodnoty $\underline{\varepsilon_i \approx 1,15}$ a po druhém průchodu $\underline{\varepsilon_i \approx 2,2}$. Průběh intenzity deformace prvního a druhého průchodu je uveden na obr. 4.2.



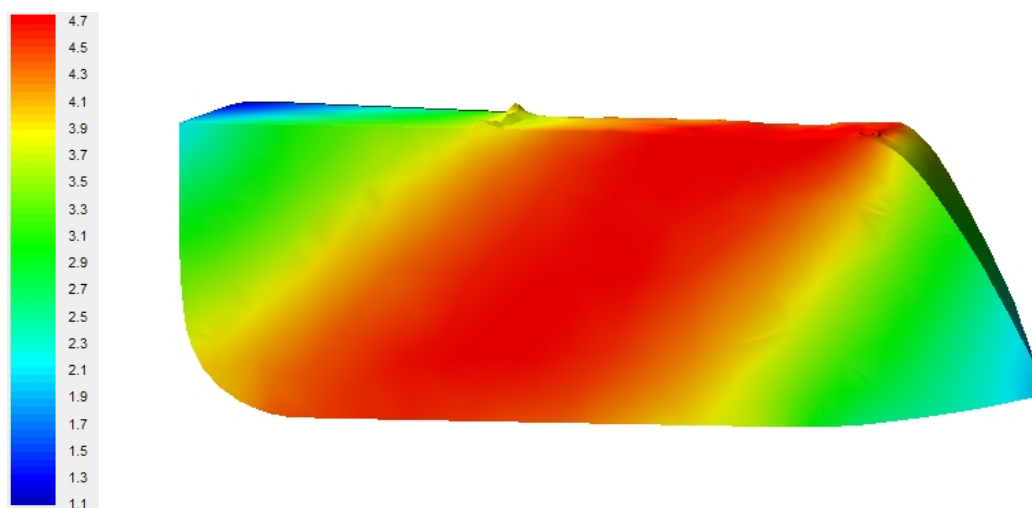
Obr č. 4.2 Průběh intenzity deformace po 1. a 2. průchodu



Obr. č. 4.3 Průběh intenzity deformace po 3. a 4. průchodu

Hodnoty intenzity deformace po třetím průchodu kanálem dosahují maximální velikosti $\varepsilon_i \approx 3,1$ a po čtvrtém průchodu se ustálí na hodnotě $\varepsilon_i \approx 3,95$. Průchod třetího a čtvrtého protlačení jsou znázorněny na obrázku 4.3.

V pátém průchodu dosahuje intenzita deformace nejvyšších hodnot a to $\varepsilon_i \approx 4,75$. Průběh pátého průchodu kanálem a jeho průběh intenzity deformace je graficky zobrazen na obr. 4.4.



Obr. 4.4 Průběhy intenzity deformace po 5. průchodu

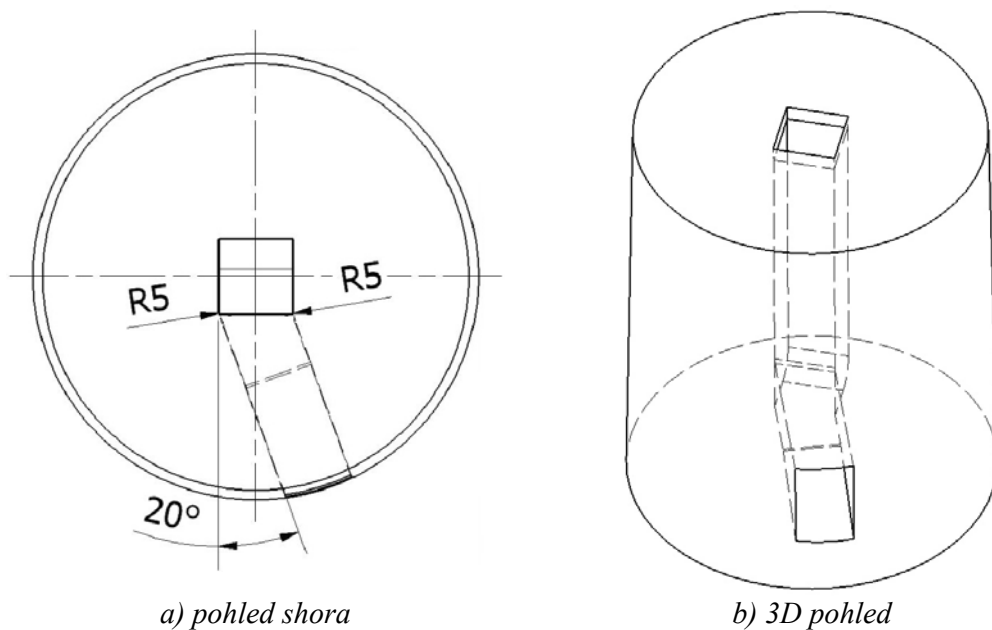
Dosažené hodnoty průběhů intenzity deformace při protlačování slitiny AlMn1Cu kanálem ECAP jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Tab. 4.1 Dosažené hodnoty intenzity deformace slitiny AlMn1Cu

Počet průchodů	Intenzita deformace [-] vychýlení o 10°
1	1,15
2	2,2
3	3,1
4	3,95
5	4,75

4.2 Konstrukční návrh s vychýlenou výstupní částí protlačovacího nástroje o 20°

Geometrie nástroje je stejná jako u konstrukčního návrhu s vychýlenou výstupní částí o 10°, změna proběhla jen u vychýlení horizontálního kanálu nástroje a to o 20° (viz. obr. 4.5). Na výstupu je kanál upraven o rozšířenou část jako u klasické geometrie nástroje.

**Obr. 4.5** Nástroj ECAP s vyosenou výstupní částí 20°

Intenzita deformace

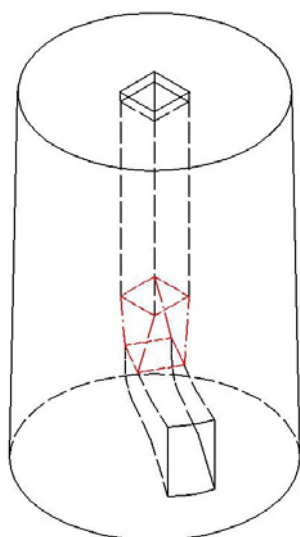
Velikost intenzity deformace pro nástroj s vychýlenou výstupní částí o 20° , poloměry zaoblení $R1 = 4 \text{ mm}$, $R2 = 0,5 \text{ mm}$, $R5 = 5 \text{ mm}$ a úhly nástroje $\phi = 90^\circ$, $\psi = 90^\circ$ dosahuje maximálních hodnot uvedených v tabulce 4.2. Grafické znázornění průběhů intenzity deformace se slitinou AlMn1Cu jsou uvedeny v kapitole 3.1.1.

Tab. 4.2 Dosažené hodnoty intenzity deformace slitiny AlMn1Cu

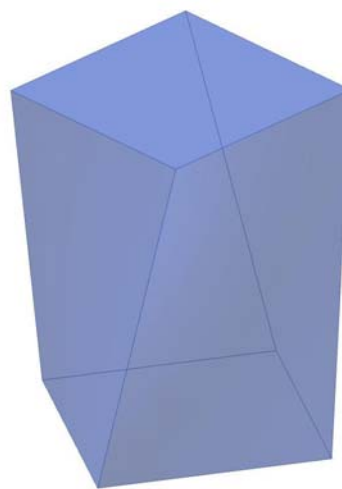
Počet průchodů	Intenzita deformace [-] vychýlení o 20°
1	1,2
2	2,3
3	3,3
4	4,3
5	5,1

4.3 Konstrukční návrh nástroje se šroubovicí ve vertikální části kanálu

Tato úprava geometrie nástroje spočívá ve vytvoření šroubovice s pootočením o 30° v místě napojování horizontálního a vertikálního kanálu (viz. obr. 4.6).



a) 3D pohled



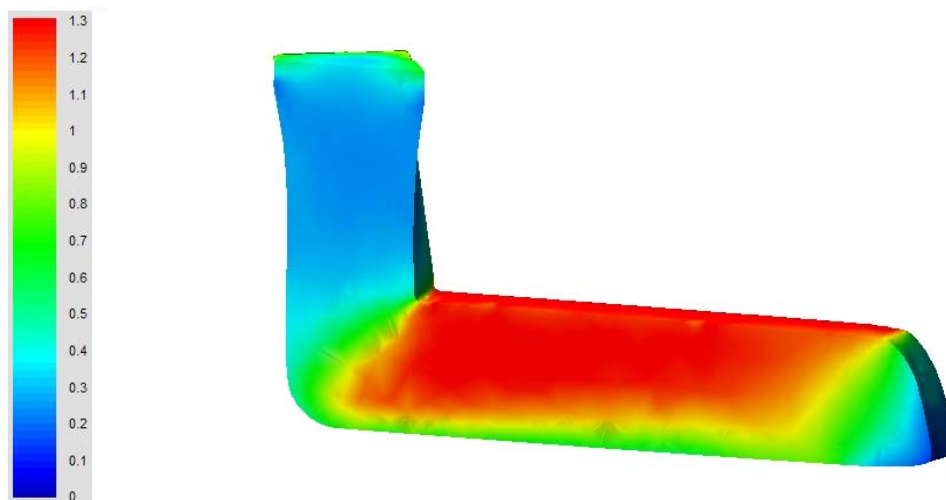
b) 3D pohled na šroubovici

Obr. 4.6 Nástroj ECAP se šroubovicí ve vertikální části kanálu

Předpokladem je zvýšení stupně deformace změnou „cesty deformace“ ve vzorku po průchodu kanálem s touto geometrií. Nástroj se šroubovicí ve vertikální části kanálu s pootočením o 30° má poloměry kanálu $R1 = 4 \text{ mm}$, $R2 = 0,5 \text{ mm}$ a úhly kanálu $\phi = 90^\circ$, $\psi = 90^\circ$, $\lambda = 30^\circ$. Schéma šroubovice je zobrazeno na obr. 4.9 b).

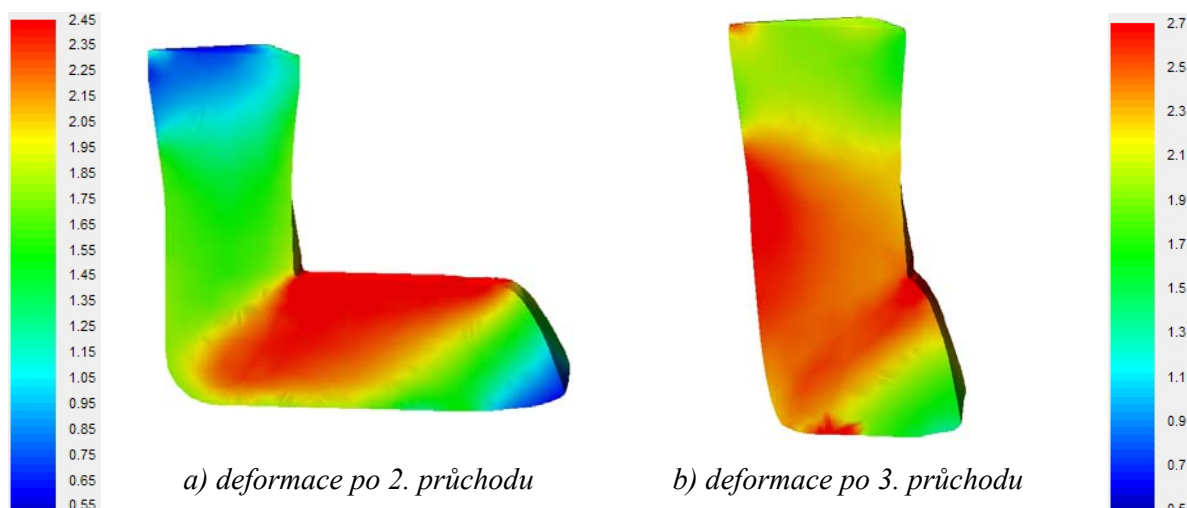
Intenzita deformace

Pro simulaci procesu ECAP je použit vzorek s prodlouženou délkou $l = 68 \text{ mm}$. Z důvodu ořezání šroubové části ve 3D graphical editoru programu QForm, tak aby se vzorek mohl opětovně protlačit jako v reálných experimentech. Ořezání vzorku se také provádí z důvodu zamezení tvorby matematických chyb. Proto jsem mohl provést protlačení pouze necelých tří průchodů.



Obr. 4.7 Průběhy intenzity deformace po 1. průchodu

Deformační přetvoření se začíná vytvářet již v části kanálu se šroubovicí kde intenzita deformace dosahuje velikosti $\underline{\varepsilon_i \approx 0,4}$. Po protlačení vzorku v přechodu napojení kanálů má intenzita deformace maximální hodnotu $\underline{\varepsilon_i \approx 1,3}$, což je zatím nejvyšší dosažená hodnota po prvním protlačování nástrojem ECAP. Oproti klasické geometrii kanálu je intenzita deformace vyšší o $\Delta \underline{\varepsilon_i \approx 0,15}$.



Obr. č. 4.8 Průběh intenzity deformace po 2. a 3. průchodu

Ve druhém průchodu kanálem se intenzita deformace dále zvětšuje a dosahuje maxima na hodnotě $\varepsilon_i \approx 2,45$. Třetí průchod je kvůli délce vzorku nedokončen a bude předmětem dalšího vývoje a simulací.

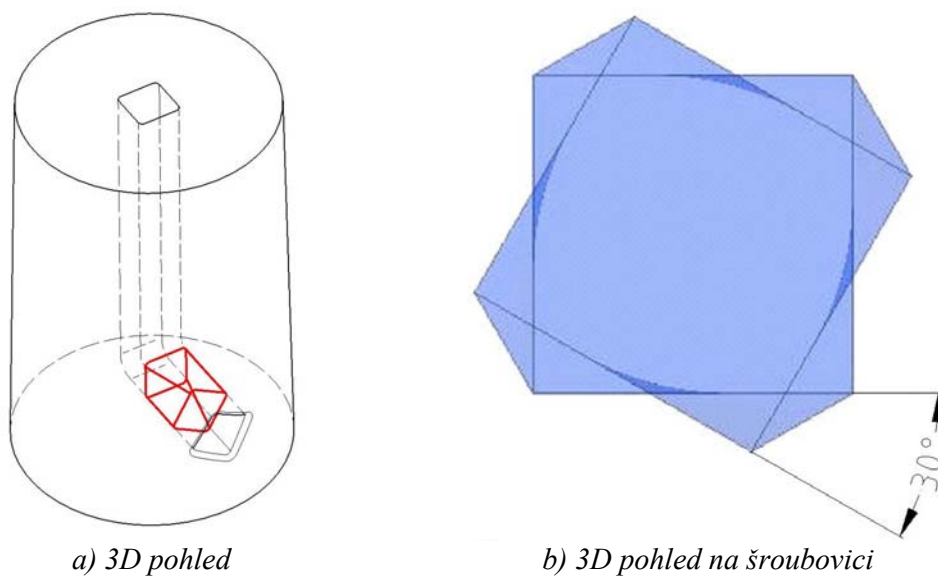
Tab. 4.3 Dosažené hodnoty intenzity deformace slitiny AlMn1Cu

Počet průchodů	Intenzita deformace [-] šroubovice vertikální
1	1,3
2	2,45
3	~2,7

Dílčí výsledky simulace protlačování nástrojem se šroubovicí ve vertikální části ukazují nejvyšší hodnoty.

4.4 Konstrukční návrh nástroje se šroubovicí v horizontální části kanálu

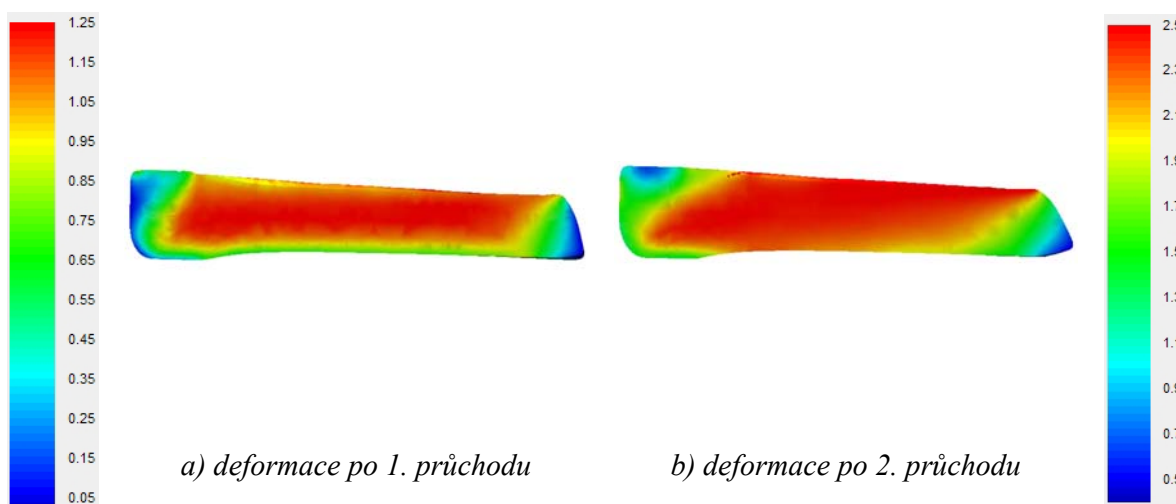
Nástroj se šroubovicí v horizontální části kanálu s pootočením o 30° má poloměry kanálu $R1 = 4 \text{ mm}$, $R2 = 0,5 \text{ mm}$ a úhly kanálu $\phi = 90^\circ$, $\psi = 90^\circ$, $\lambda = 30^\circ$. Schéma šroubovice je zobrazeno na obr. 4.9 b).



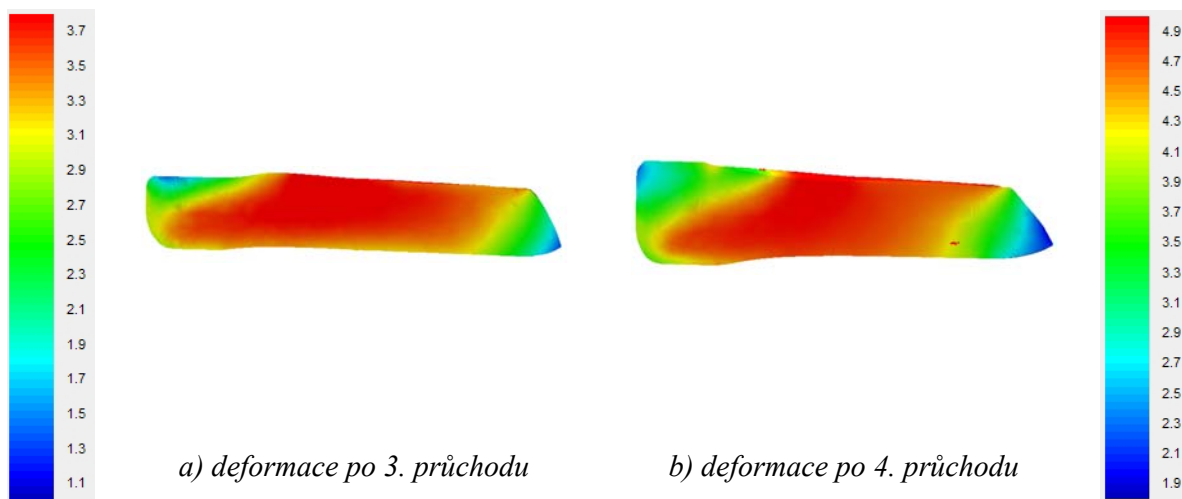
Obr. 4.9 Nástroj ECAP se šroubovicí v horizontální části kanálu

Intenzita deformace

Hodnoty intenzity deformace po prvním průchodu kanálem dosahují maximální velikosti $\underline{\varepsilon_i \approx 1,25}$ (viz. obr. 4.10 a) a po druhém průchodu $\underline{\varepsilon_i \approx 3,95}$ (viz. obr. 4.10 b).



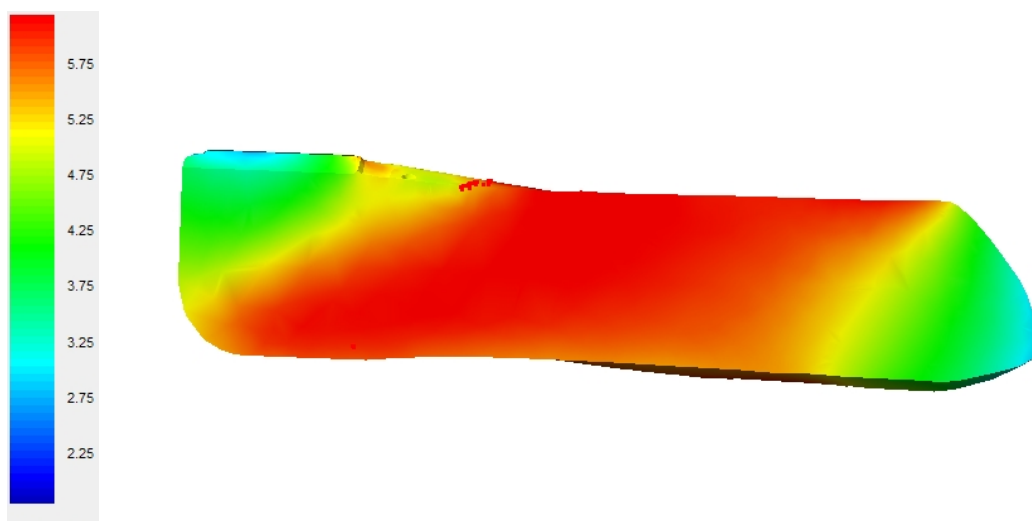
Obr. 4.10 Průběh intenzity deformace po 1. a 2. průchodu



Obr. č. 4.11 Průběh intenzity deformace po 3. a 4. průchodu

Ve třetím a čtvrtém průchodu kanálem deformační přetvoření dále roste a to na hodnoty $\underline{\varepsilon_i \approx 3,8}$ po třetím průchodu a $\underline{\varepsilon_i \approx 5}$ po čtvrtém protlačení kanálem. Výsledky simulací třetího a čtvrtého průchodu jsou graficky znázorněny na obr. 4.11 a) b).

V pátém průchodu dosahuje intenzita deformace nejvyšších hodnot a to $\underline{\varepsilon_i \approx 6,2}$, což je zatím nejvyšší dosažená hodnota při simulacích protlačování pátého průchodu. Jeho průběh intenzity deformace je graficky zobrazen na obr. 4.12. Dosažené hodnoty intenzity deformace vycházejí ze vstupních křivek přetvárného odporu nezpevněné slitiny AlMn1Cu.



Obr. 4.12 Průběhy intenzity deformace po 5. průchodu

Předpoklad významného zvýšení stupně deformace změnou „cesty deformace“ ve vzorku po jednotlivých průchodech kanálem s touto upravenou geometrií byl správný.

Tab. 4.4 Dosažené hodnoty intenzity deformace slitiny AlMn1Cu

Počet průchodů	Intenzita deformace [-] šroubovice horizontální
1	1,25
2	2,5
3	3,8
4	5
5	6,2

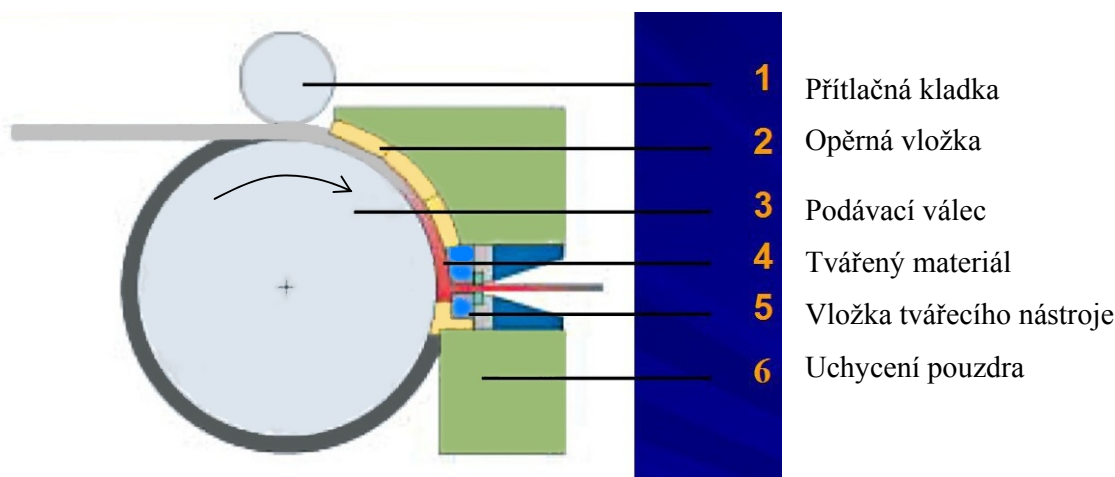
Uvedený konstrukční návrh bude předmětem dalšího vývoje. Teoreticky byl ověřován předpoklad až 30 % zvýšení stupně deformace v 1. průchodu nástrojem ECAP. Tímto konstrukčním řešením by došlo k podstatnému zefektivnění celého procesu.

Vyhodnocení veškerých dosažených výsledků provedených simulací je prezentováno v kapitole 6.

5 NÁVRH SIMULACE PROTLAČOVÁNÍ AL PLECHU MODIFIKOVANÝM NÁSTROJEM CONFORM

5.1 Úvod do problematiky CONFORM

CONFORM (*Continuous Extrusion Forming*) je metodou, která byla původně vyvinuta pro plynulé vytlačování, ale na základě problémů s opotřebením nebyla použita. Na tuto metodu se v současnosti opět navázalo a opakovaným použitím se zkouší dosáhnout velmi vysokého stupně deformace. Obrázek 5.1 ukazuje princip procesu CONFORM, která je podobná jako ECAP. Materiál ve formě tabulového pásu je zásoben "podávacím válcem" s podporou "přítlačné kladky" a tlačén segmentem do "vložky tvářecího nástroje". Tvářecí nástroj je situovaný v upevněném pouzdře. Intenzivní deformace materiálu přináší požadované zjemnění zrna nastávající ve vložce. Stupeň sklonu pro tuto metodu je $100^\circ - 130^\circ$. V jednotlivých průchodech dochází k menšímu stupni deformace, což znamená, že tato metoda požaduje vyšší množství průchodů pro získání stejné struktury zjemnění jako u procesu ECAP.

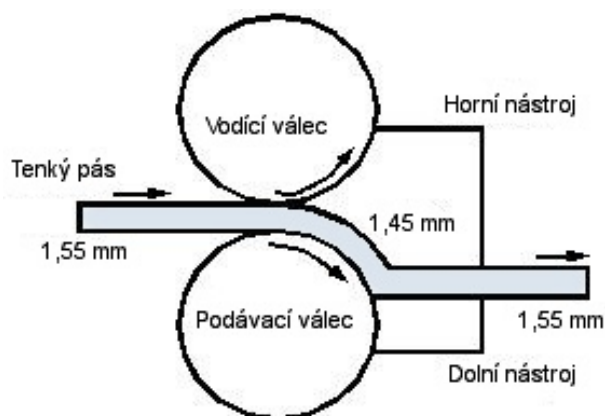


Obr. 5.1 Schématické znázornění technologie CONFORM

Formovací matrice je opatřena dvěma kanály, jejichž tloušťka se vzájemně liší, tloušťka venkovního kanálu (1,55mm) je mírně větší než tloušťka vnitřního kanálu (1,45mm), jak je vidět na obrázku 5.2. Úhel kanálu Φ , který vznikne protnutím vnějšího a vnitřního kanálu jako na obr. 10, může být zvětšen ze 100° na 140° s úhlem zakřivení $\Psi = 0^\circ$. Pás má počáteční tloušťku 1,55mm, je podáván podávacím válcem a je přetvářen na

tloušťku 1,45mm a je následně veden nástrojem směrem k tvářecí zóně. Dále je pás vtlačován přes hlavní funkční část s tvářecí zónu, kde se vnější a vnitřní kanály protínají a vychází vnějším kanálem při zachování počáteční tloušťky (1,55 mm).

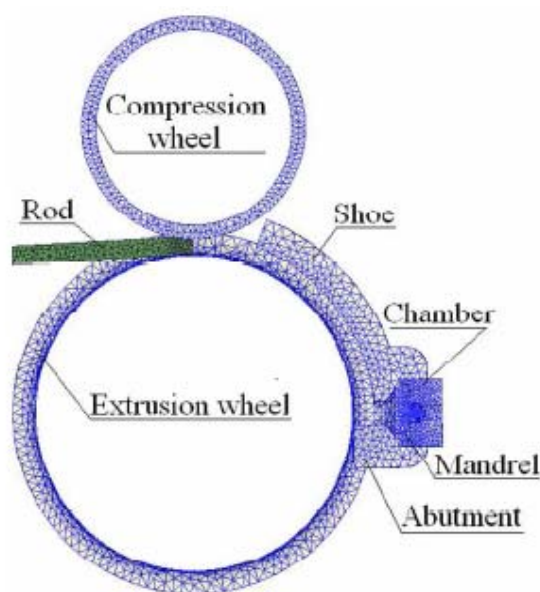
Podáváním vzorku – vyvozenou třecí silou hnacího válce, namísto podávání materiálu pomocí průtláčnicku u hydraulického lisu, bylo umožněno nejen vytváření nepřetržité (kontinuální) operace, ale také tváření různých rozměrů kovových pásů.



Obr. 5.2 Schématické procesu CONFORM

5.2 Současný stav vývoje simulace procesu CONFORM

Kontinuální vytlačování otvorem CONFORM má významné výhody: žádné omezení délky produktu, nízká spotřeba energie, snížení nákladů a vysoká automatizace. Obrázek 5.3 ukazuje schéma nástroje CONFORM v FE modelu.



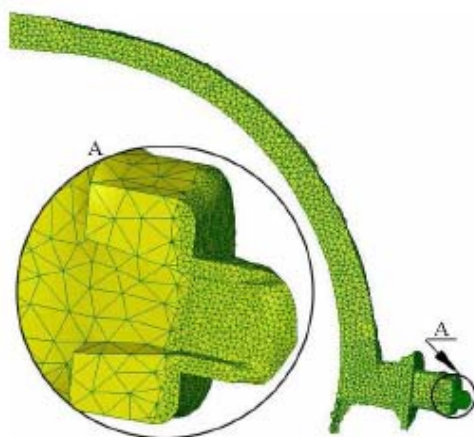
Obr. 5.3 FE model systému CONFORM [13]

V pracovním procesu je prut nejdříve vtlačován hnacím kolem přes vložku. Následně je vtáhnutý do dutiny, kde je dále protlačen přes nástroj. CONFORM je široce aplikovatelný pro zpracování slitin hliníku a mědi.

Byly vypočítány hodnoty jako rychlost, napětí, tlak a teplota. To je důležité pro výběr materiálu, strojní součásti, nástroje a mazání. K modelování simulace byl použit program DEFORM. Obrázek 5.4 ukazuje konečný FE model [13].

Parametry pro proces CONFORM

▪ Rychlost hnacího kola [rad/s]	1,047
▪ Výronková drážka [mm]	1,0
▪ Teplota [°C]	20
▪ Rádus kola [mm]	170
▪ Čas kroku [s]	0,0025
▪ Koeficient tření mezi drátem a patkou [-]	0,3
▪ Koeficient tření mezi drátem a nástrojem [-]	0,9
▪ Koeficient tření mezi hnacím kolem a drátem [-]	0,3

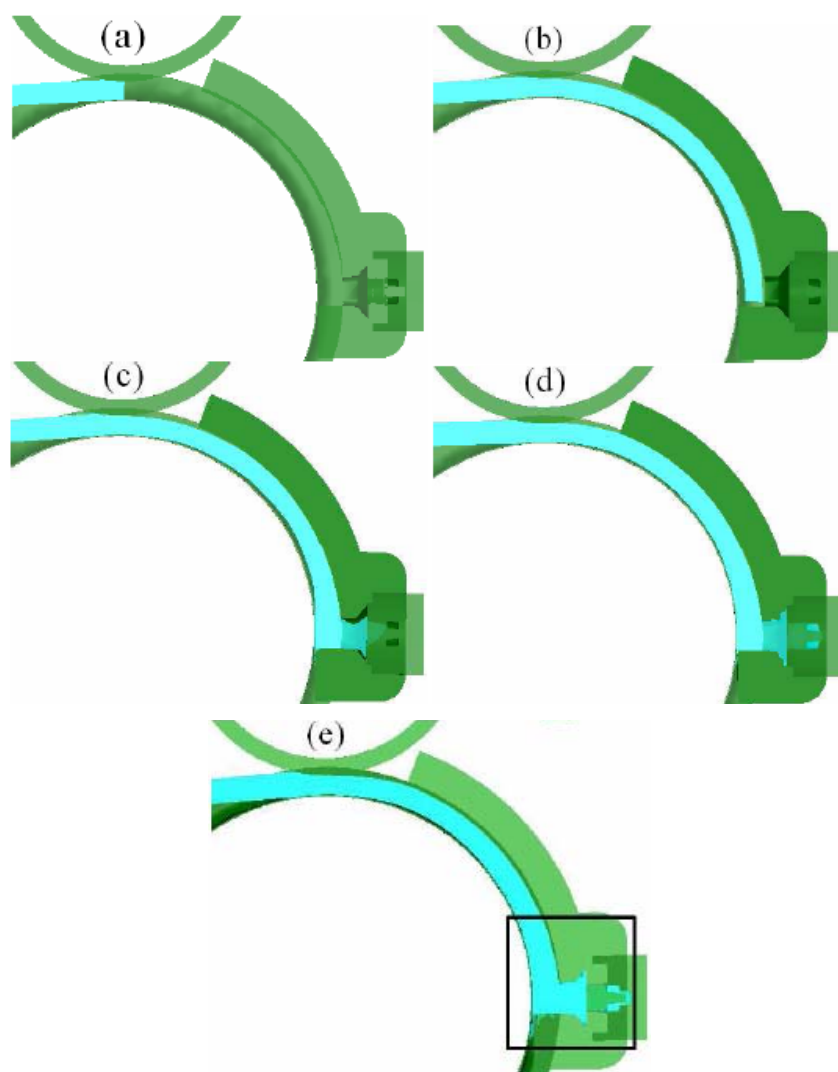


Obr. 5.4 Rozčlenění síť komůrkového oka při simulaci [13]

Tok materiálu

Podle deformačních vlastností jej můžeme rozdělit do pěti stupňů (viz. obr. 5.5):

- a) první stupeň stlačení přítlačnou kladkou
- b) plnicí stupeň
- c) přechovací stupeň
- d) ohřívací stupeň
- e) tvářecí stupeň.



Obr. 5.5 Rozčlenění sítě komůrkového oka při simulaci [13]

Deformační oblast zobrazená výřezem na obrázku 5.5 e) je studována podrobně. Rychlostní pole, pole deformace, pole napětíové a teplotní pole v této oblasti je taktéž v oblasti ověřování [13].

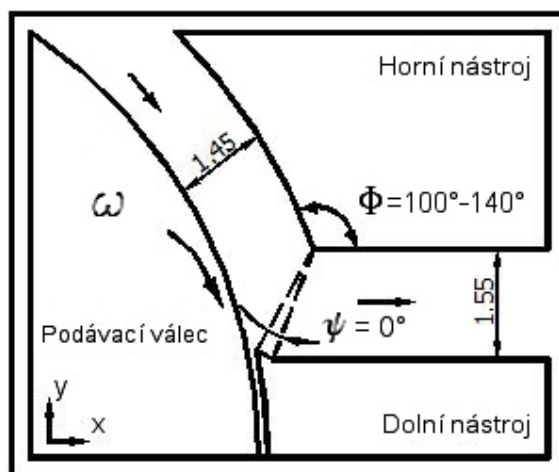
5.3 Návrh simulace protlačování Al plechu modifikovaným nástrojem CONFORM

Další oblast výzkumu je zaměřena rovněž na vývoj nástroje pro tváření pásů plechu. Pro samotnou matematickou simulaci je potřeba navrhnout tvar a geometrii nástroje CONFORM. Dále navrhnout tvar, rozměry a materiálové vlastnosti zkušebních vzorků. Experimentálně stanovit základní tvářecí parametry k dosažení potřebných strukturních a mechanických vlastností.

Předpokládané výstupy matematické simulace:

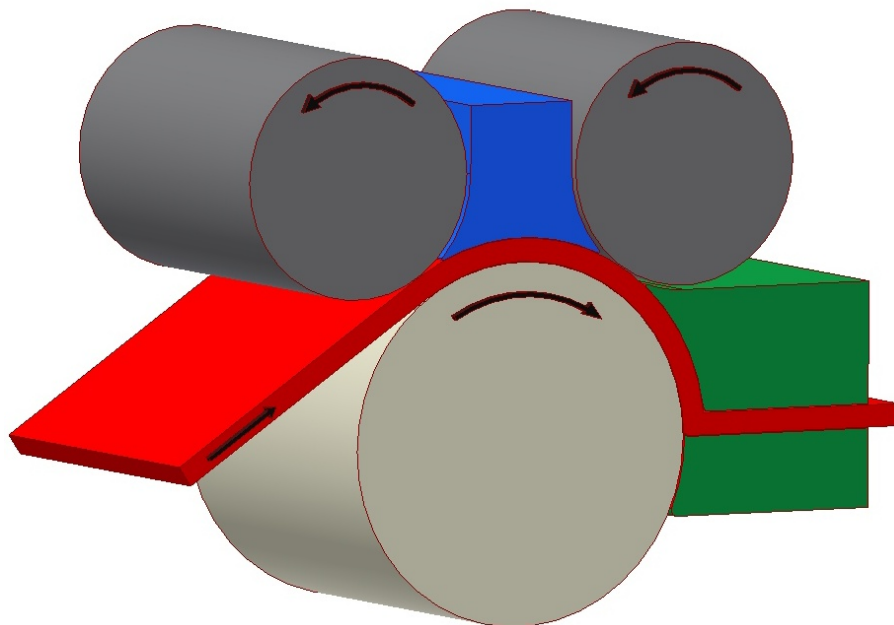
- Optimalizace počtu průchodů nástrojem změnou cesty deformace, variace profilu a rozměrů tvářecího nástroje.
- Vliv geometrie nástroje, teplotně-deformačních a technologických parametrů na výsledné vlastnosti zkoušených materiálů.
- Porovnání s experimentálními výsledky.

Vývoj a následná simulace procesu bude probíhat v programech QForm 3D a také nově v programu Simufact.forming jenž je vylepšený nástupce softwarů SuperForm & SuperForge. Dále by bylo vhodné pro srovnávání dosažených mechanických vlastností pomocí 3D matematické simulace by mohl být použit program MarcMentat, který ovšem pracuje pouze ve 2D prostoru.



Obr. 5.6 Detail kanálu CONFORM

Schéma návrh simulace (viz. obr. 5.7) byl vytvořen s ohledem na co nejpřesnější interpretaci tvářecího zařízení CONFORM. Simulace procesu může být ovšem velmi zjednodušená či jinak pozměněna a bude podřizována též omezeními danými tvářecími programy. Otáčivý pohyb nástrojů a posuvný pohyb vzorku s třením mezi materiálem a nástrojem nemusí být zcela adekvátní praktické úloze. Vyplývá to též ze složitosti procesu CONFORM.



Obr. 5.7 Vlastní návrh simulace procesu CONFORM

Matematická simulace technologie vícenásobného tváření CONFORM bude oblastí dalšího studia a výzkumu. Jde zejména o správné namodelování vícenásobného průchodu vzorku kanálem nástroje CONFORM. Vývoj a správné nasimulování tohoto procesu se jeví jako velmi potřebné, zejména z hlediska definice geometrie nástroje i podmínek tváření.

6 VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ A POZNATKŮ TECHNOLOGIE ECAP

Tato diplomová práce byla zaměřena na modelování vlivu geometrie nástroje na velikost deformačně-napětového stavu při vícenásobné plastické deformaci u slitiny AlMn1Cu a slitiny AlFe1,5Mn. Neboť pro zvýšení stupně deformace je důležitým faktorem úprava geometrie nástroje.

Tato část je zaměřena na porovnání dosažených dílčích výsledků z hlediska definice geometrie nástroje a materiálu vzorku k dosažení co nejvyššího stupně deformace v jednom a více průchodech nástrojem ECAP, což v celkovém důsledku vede ke značnému zjemnění zrna u tvářeného polotovaru a tímto ke zvýšení jeho mechanických vlastností při zachování dobré tvářitelnosti.

Tab. 5.1 Dosažené hodnoty intenzity deformace

Typ průchodu	Materiál		Počet průchodů				
			1.	2.	3.	4.	5.
Klasický kanál	AlMn1Cu		1,1	2,05	2,75	3,5	4,2
		AlFe1,5Mn	1,1	2	2,7	3,6	4,2
Vychýlení o 10°	AlMn1Cu		1,15	2,15	3,1	3,95	4,75
		AlFe1,5Mn	-	-	-	-	-
Vychýlení o 20°	AlMn1Cu		1,2	2,3	3,3	4,3	5,1
		AlFe1,5Mn	1,2	2,1	3,25	4,2	5,3
Šroubovice vertikální	AlMn1Cu		1,3	2,45	~2,7	-	-
		AlFe1,5Mn	-	-	-	-	-
Šroubovice horizontální	AlMn1Cu		1,25	2,5	3,8	5	6,2
		AlFe1,5Mn	-	-	-	-	-

Slitiny AlMn1Cu a AlFe1,5Mn nevykazovaly rozdílný průběh intenzity deformace a to jak v prvním průchodu, pro technickou praxi nejdůležitějším, tak i v dalších následujících průchodech. Proto byla slitina AlMn1Cu vybrána pro následující simulace se změnou geometrie kanálu ECAP.

Konstrukční návrhy protlačovacího nástroje byly voleny s ohledem na dosažení co nejvyššího stupně intenzity deformace v protlačovaném vzorku u prvního průchodu. U klasické geometrie nástroje bylo dosaženo v prvním průchodu u obou slitin nejnižšího stupně přetvoření a to $\underline{\varepsilon_i \approx 1,1}$. Při koncepci nástroje s vychýlením výstupní části o 10°, intenzita deformace dosáhla hodnoty $\underline{\varepsilon_i \approx 1,15}$. První průchod nástrojem s vychýlenou horizontální částí o 20° intenzita deformace dosáhla hodnoty $\underline{\varepsilon_i \approx 1,2}$ u obou slitin AlMn1Cu i AlFe1,5Mn. Nejvýraznější růst intenzity deformace po prvním průchodu se jeví při kombinaci kanálu ECAP se šroubovicí (Twist extrusion). Intenzita deformace $\underline{\varepsilon_i \approx 1,25}$ byla dosažena při protlačování vzorku kanálem se šroubovicí v horizontální části a hodnota $\underline{\varepsilon_i \approx 1,3}$ byla dosažena při použití kanálu se šroubovicí ve vertikální části. Dosažený stupeň deformace při prvním průchodu u nástroje se šroubovicí ve vertikální části je o 18 % efektivnější oproti použití klasické geometrie.

Po druhém průchodu jsou v dosažených velikostech deformací rozdíly - $\Delta \underline{\varepsilon_i \approx 0,5}$. Nejnižší hodnota $\underline{\varepsilon_i \approx 2}$ je dosažena při protlačování klasickým kanálem ECAP. Naopak nejvyšší hodnota $\underline{\varepsilon_i \approx 2,5}$ je dosažena při použití nástroje se šroubovicí v horizontální části kanálu.

Důležitý je třetí průchod při němž se pro dosažení stejného stupně přetvoření $\underline{\varepsilon_i \approx 3,8}$ proces ECAP zkracuje o jeden průchod při použití upravené geometrie kanálu se šroubovicí v horizontální části, oproti čtyřem průchodům při použití klasické geometrie kanálu a dosažení stejné hodnoty intenzity deformace.

Největších tvářecích parametrů (velikost intenzity napětí a intenzity deformace) bylo dosaženo při pátém průchodu kanálem nástroje ECAP. Rozdíl velikostí intenzity deformace je mezi klasickou a upravenou geometrií nástroje nejvyšší a to $\Delta \underline{\varepsilon_i \approx 2}$. Efektivita procesu ECAP s upravenou geometrií oproti klasickému kanálu je o 21% vyšší při použití kanálu s vychýlenou výstupní částí o 20° a o 47,6% pro použití geometrie se šroubovicí na výstupní části.

Z průběhů velikosti intenzity deformace bylo prokázáno, že hodnoty ε_i jsou u druhého průchodu nástrojem vyšší oproti hodnotám po prvním průchodu. Dle výsledných parametrů po jednotlivých průchodech dochází ke kumulaci deformačního zpevnění.

6.1 Úprava nástroje s cílem zvýšení intenzity deformace

Pro zvýšení stupně deformace je důležitým faktorem úprava geometrie nástroje. Cílem je snížení počtu průchodů nástrojem ECAP. Po prvním průchodu nástrojem ECAP s upravenou geometrií nástroje by měl být stupeň deformace vyšší než při použití nástroje bez úpravy geometrie nástroje. Výsledkem je zvýšení stupně deformace vedoucí k vyššímu zjemnění zrna a tím k celkovému zvýšení efektivity procesu vícenásobné plastické deformace.

Daný předpoklad byl ověřen a potvrzen. V průběhu matematické simulace dochází k nárůstu maximálních hodnot intenzity napětí a intenzity deformace u obou analyzovaných slitin (viz. tab. 5.1) při upravené geometrii nástroje, ve srovnání s klasickou variantou.

Bylo ověřeno odlehčení na výstupní části nástroje jak v simulačních procesech tak i při experimentech v laboratoři. V průběhu procesu dochází k podstatnému snížení kontaktního tlaku na nástroj a vzorek, díky kratší době styku mezi nástrojem a vzorkem. Jsou zachovány parametry zaoblení kanálu i při tvarově upraveném nástroji pro vícenásobný počet protlačování.

Konstrukční návrh nástroje s vychýlenou výstupní částí po celé délce kanálu protlačovacího nástroje byl zvolen s ohledem na dosažení vysokého stupně intenzity deformace v protlačovaném vzorku u prvního i dalších průchodech. Taktéž kombinace nástroje ECAP s procesem Twist extrusion byla zvolena jako dobrý příslib pro zvýšení efektivity tvářecího procesu.

Důležitým faktorem dalšího vývoje bude optimalizace geometrie vnitřního poloměru nástroje, která ovlivňuje výslednou velikost deformace v protlačovaném vzorku. Obtížné budou rovněž konstrukce upraveného nástroje ECAP oproti konvenčním nástrojům (zejména u technologie Twist Extrusion a CONFORM). Jedná se především o problém zachování neměnné geometrie kanálu vzhledem k vysokým stupňům deformace a tvářecím tlakům u těchto procesů.

ZÁVĚR

V této diplomové práci s názvem „Simulace protlačování slitin AlMn1Cu a AlFe1,5Mn klasickým a upraveným nástrojem ECAP jsem na základě literárních pramenů, vlastních poznatků a řešení analyzoval technologii ECAP a také vývoj simulace pro proces CONFORM. Stanovil jsem cíl diplomové práce a popsal zásady řešení dané problematiky. Uvedl jsem celkové výsledky, které dokumentují správnost použité metodiky, a které jsou základem pro další vývoj.

- Při navrhované technologii ECAP probíhá tváření vzorku kanálem nástroje v několika etapách. V první fázi se vzorek pěchuje v zakřivené části kanálu a následně se protlačuje. Daným postupem dochází k vytvoření pásu střížné deformace v celém objemu protlačovaného vzorku. V důsledku pěchovacího procesu je dosaženo vysokého stupně deformace, který je zapotřebí pro vznik subzrnn (postupného zjemňování struktury).
- Dosažená celková deformace vyplývá z počtu cyklů násobených deformací v 1. průchodu. Při vícenásobném protlačení, může být vyvinutá velmi vysoká efektivní deformace v celém objemu.
- Při navrhování nástrojů pro technologii ECAP jsem se soustředil na změnu cesty deformace, což umožňuje docílení podstatného zvýšení přetvoření materiálů (stupně deformace) už v prvním průchodu kanálem tvářecího nástroje.
- Pomocí matematické simulace bylo prokázáno, že vychýlení kanálu v horizontální části i geometrie kanálu se šroubovicí vede k podstatnému zvýšení intenzity deformace v prvním i více průchodech vzorku kanálem ECAP. Tímto bylo dosaženo finálního vysokého stupně deformace potřebného pro rozdrobení zrna.

- Technologie CONFORM (DRECE) jsou v současné době vyvíjenými technologiemi a jeví se jako velmi perspektivní pro vývoj velmi jemnozrnné struktury už v polotovarech. Dochází tímto k podstatnému zkvalitnění polotovarů, ze kterých je následně možno vyrábět finální produkty. při náhradě klasického válcování. Výzkum v této oblasti se jeví jako velmi potřebný z hlediska aplikace v praxi.

V současné době dochází k intenzivnímu vývoji technologií využívajících vícenásobnou plastickou deformaci. Jedná se o výrobu nového typu materiálů s vysokými mechanickými vlastnostmi a zároveň zachovávajících velmi dobrou tvářitelnost. Poznatky, uvedené v mé práci, dávají předpoklad pro další její ověřování v poloprovozní praxi.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu prof. Ing. Stanislavu Ruzzovi, CSc. a panu prof. Ing. Jiřímu Hrubému, CSc. z VŠB-TU v Ostravě za cenné připomínky, odbornou pomoc a konzultace při řešení úkolu.

Rovněž bych rád poděkoval svým rodičům za značnou podporu v průběhu celého studia.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOPŘIVA, M. *Počítačová podpora technologie*, Brno, 2002, Fakulta strojního inženýrství VUT Brno, Odbor tváření kovů a plastů, str. 13-16.
- [2] GUTKIN, M.Yu. - OVINKO, I.A. - PANDE, C.S. *Theoretical model of plastic deformation processes in nanocrystalline materials*, Rev. Adv. Mater. Sci., September 2001, vol. 2, pp. 80 - 102.
- [3] OLEJNIK, L. – ROSOCHOWSKI, A. – RICHERT, M. *Incremental ECAP of plates*, Materials Science Forum, Vol. 584-586 (2008), pp. 108-113.
- [4] OLEJNIK, L. – ROSOCHOWSKI, A. – RICHERT, M. *Double-Billet Incremental ECAP*, Materials Science Forum, Vol. 584-586 (2008), pp. 139-144.
- [5] VAILLANT, M.L. - KERYVIN, V. - ROUXEL, T. - KAWAMURA, Y. *Changes in the mechanical properties of a $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$ bulk metallic glass due to heat treatments*, Scripta Materialia, March 2002, vol. 48, p. 19 - 23.
- [6] CAO, C.D. - HERLACH, D.M. - KOLBE, M. - GORLER, G.B. - WEI, B. *Rapid solidification of $Cu_{84}Co_{16}$ alloy undercooled into the metastable miscibility gap under different conditions*, Skripta Materialia, July 2002, vol. 48, p. 5 - 9.
- [7] HEBESBERGER, Th. - VOHAUER, A. - WADSAK, R. - STÜWE, H. P. - PIPPAN, R. *Production, structure and properties of nanocrystalline materials*, 2002, Jg. 147, pp. 358-363.
- [8] QUANTOR LTD. *QForm3D software* [online], Overview, Dostupné z [www](http://www.qform3d.com/index.php)
<http://www.qform3d.com/index.php>
- [9] QForm: *Nejjednodušší simulační systém*. Krok za krokem, Verze 2.1
- [10] *Lexikon technických materiálů 3.0* [počítačový program], srpen 2003
- [11] HORITA, Z. – FURUKAWA, M. – NEMOTO, M. - LANGDON, T. G. *Development of fine grained structures using severe plastic deformation*, Materials Science and Technology, pp. 1239 – 1245.
- [12] ITA s.r.o. : *Uživatelský manuál programu FORMFEM*, Ostrava 19.
- [13] PENGUYUE, W. - YUCAI, W. - SHUISHENG, X. - GUOIJIE, H. *Numerical Simulation on Conform Process of Aluminium Alloy Rectangular Hollow Conductor*, Materials Science Forum, Vol. 546-549 (2006), pp. 735-740.

SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ SOUVISEJÍCÍCH S TOUTO DIPLOMOVOU PRACÍ

- [1] KEDROŇ, J. *Matematická simulace procesu protlačování nástrojem ECAP ve 3D prostoru*, Ostrava, 2007, Bakalářská práce na Fakultě strojní VŠB-Technické univerzity Ostrava na katedře mechanické technologie
- [2] RUSZ, S. - MALANIK, M. - KEDROŇ, J. *Increase of efficiency of the ECAP technology at grain refinement of the alloy AlMn1Cu*, November 2008, Archives of Materials Science and Engineering, vol 34/1, November 2008, p. 52 – 56.
- [3] RUSZ, S. - MALANIK, M. - KEDROŇ, J. *Mathematical Simulation Change of Deformation Process at Severe Plastic Deformation*, 2007, 11th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technologies" TMT 2007, p. 103-106. ISBN 978-9958-617-34-8